

## 1. INTRODUCTION

Iron is a unique element, which is around and inside us. It has 8 valence electrons ( $3d^64s^2$ ) and electron configuration  $1s^22s^22p^63s^23p^63d^64s^2$ , meaning that iron has K-shell – 2 electrons, L-shell – 8 electrons, M-shell – 14 and N-shell 2 electrons. Under regular conditions, iron is a silvery-white metal, ductile, and easily malleable. Iron is a metal with medium activity; it forces hydrogen from water solutions of such strong acids as HCl and  $H_2SO_4$ , forming salts with Iron(II). At the same time, iron does not react with such concentrated strong acids as  $H_2SO_4$  and  $HNO_3$  (Akhmetov, 1992). Iron has variable valence; it will usually readily give off two electrons from the outermost shell to achieve a stable electronic configuration of  $Fe^{2+}$ , or it may give off two electrons from its N-shell and one electron from its M-shell to become  $Fe^{3+}$ . The main isotopes of iron are  $^{54}Fe$  (5.8%),  $^{56}Fe$  (91.72%),  $^{57}Fe$  (2.2%), and  $^{58}Fe$  (0.28%). The melting point of iron is 1808 K, its boiling point is 3023 K, and specific gravity is  $7874 \text{ kg/m}^3$  (at 293 K). It has four allotropic forms known as  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , and  $\delta$ , with transition points at 1043 K, 1201 K, and 1803 K between them, respectively (Lide, 2004). The  $\alpha$  form is magnetic, but when iron is transformed into the  $\beta$  form, the magnetism disappears, although the lattice remains unchanged.

Pure iron is very chemically reactive; it corrodes rapidly especially in moist air or at elevated temperatures (Lide, 2004), and is extremely rare. However, native iron is found as a principal component of a class of meteorites known as “siderites”, and as a minor constituent of other types of meteorites (Lide, 2004). Iron ores are usually represented by oxides (hematite  $Fe_2O_3$ , magnetite  $Fe_3O_4$ , and limonite  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ), sulphides (pyrite  $FeS_2$ ), and carbonates (siderite  $FeCO_3$ ). Iron does not react with air at ordinary temperatures; when heated in oxygen it forms magnetite, and when heated in moist air it forms hematite and Iron(III) hydroxide. At the same time, nor does iron react with water to form a hydroxide at ordinary temperatures.

Iron compounds are important natural pigments of different colors. Iron is the primary component of magnetic compounds in the Earth. Iron forms numerous important alloys. It could be soft and weak and it could be very strong (steel). Iron is used for construction of buildings, support for bridges, machines, automobiles, tools, etc. It is the most widely used metal in the world

today, and steel is the most important iron alloy, used in countless products. Iron is an important part of the Earth as a planet, and the main component of the Earth's iron core. Iron carries the oxygen in our blood as the primary constituent of a substance called hemoglobin in red blood cells. Latest investigations show that iron-sulfur clusters ( $[4Fe-4S]$ ,  $[3Fe-4S]$ , and  $[2Fe-2S]$ ) play a significant role in the formation of some enzymes (Walsby *et al.*, 2002; Cosper *et al.*, 2003).

Since iron can easily exist as a 2+ or 3+ valence element with equal stability, it can transform itself according to the amount of oxygen available in the environment. This fact allows some scientists to use different kinds of iron oxides (magnetite, hematite) as markers of the oxygen level in the atmosphere during the Earth evolution (Kasting and Donahue, 1980; Holland, 1984). Periods of formation of such rock deposits as banded iron formations (BIFs), redbeds, paleosols and pyrites could be used for these purposes (see Chapters 3 and 4).

Under specific thermodynamic conditions, iron may also transfer between its ferrous ( $Fe^{2+}$ ) and ferric ( $Fe^{3+}$ ) state, which may be independent of oxygen content in the atmosphere (Nagatha, 1961; Tretyakov, 1967; Pilchin and Eppelbaum, 1997). This fact plays a crucial role in conditions of stability of iron-containing rocks and minerals, as well as in some specific features of Earth's evolution, including the formation of the iron core (see Chapters 5-7).

Estimations made by the U.S. Geological Survey show that the present world reserves base of iron ore are about 150 billion tones, and world resources are estimated to exceed 800 billion tones of crude ore containing more than 230 billion tones of iron (Nokleberg *et al.*, 2005).

As a principal component of all rocks and minerals with strong magnetic properties, occurring in the Earth's strata, iron plays a crucial role in the generation of regional and local magnetic anomalies. Analysis of regional magnetic anomalies, other than determining the conventional characteristics of the magnetic source (Khesin *et al.*, 1996), includes the determination of the bottom edges of magnetized bodies (BEMB), Curie point ( $T_c$ ) of rocks and minerals, and Curie point depth (CPD) (Pilchin and Eppelbaum, 1997; Eppelbaum and Pilchin, 2006). Evidently, magnetic properties of rocks and minerals are significant factors in paleomagnetic research methods (see Chapter 8).



## 1. INTRODUCCIÓN

El Sol, nuestra estrella, sostiene todos los procesos biodinámicos de la Tierra y determina las condiciones fisicoquímicas de los planetas vecinos.

Del Sol recibimos varios productos de su actividad: por un lado la radiación solar, por otro las emisiones de su atmósfera, ya sea en forma continua como el llamado viento solar, o bien esporádica como las eyecciones de masa coronal. También llegan partículas energéticas provenientes de explosiones solares conocidas como fulguraciones, que emiten además una gran cantidad de energía luminosa en una amplia gama de longitudes de onda. Todas estas emisiones salen junto con el campo magnético del Sol, por tanto el espacio interplanetario está lleno del campo magnético y la atmósfera solares; como además los cuerpos que se encuentran en el medio interplanetario están sujetos por la gravedad solar, este espacio está controlado por nuestra estrella y por ello se le conoce como Heliosfera.

Los cuerpos embebidos en la Heliosfera responden al impacto de la actividad solar dependiendo de sus características intrínsecas: si tienen o no campo magnético o atmósfera.

En particular nuestro planeta responde a los embates de la actividad solar de varias maneras. El viento solar confina al campo geomagnético en una cavidad conocida como la magnetosfera. Ésta ocasionalmente se conecta con las líneas del campo magnético interplanetario permitiendo en ese caso una gran entrada de plasma y partículas solares al entorno terrestre que provocan cambios abruptos de la intensidad del campo magnético: las llamadas tormentas magnéticas. Las auroras son otro resultado indiscutible de la interacción de la atmósfera solar con la terrestre: las partículas del viento solar interactúan con las componentes de la atmósfera, los cuales se excitan y al desexcitarse emiten los hermosos colores de las auroras. Todos estos fenómenos son conocidos como la Actividad Geomagnética.

Entonces surge naturalmente la pregunta de ¿hasta dónde llegará el efecto de la variabilidad de

nuestra estrella en la Tierra? Como veremos más adelante, la actividad del Sol también genera una serie de perturbaciones de la atmósfera superior. Se ha especulado mucho sobre la relación Sol-clima, y actualmente hay pruebas de que ésta existe, lo cual implicaría que la variabilidad solar altera también a la capa más baja de la atmósfera terrestre.

## 2. ESTRUCTURA SOLAR

En la Figura 1 se presenta un diagrama del interior y la atmósfera solares. En el núcleo la presión ( $\sim 10^{11}$  atm) y la temperatura ( $\sim 10^7$  K) son tan altas que propician las interacciones nucleares. Dado que el elemento más abundante en el Sol es el hidrógeno ( $\sim 75\%$ ), en estas condiciones las interacciones entre protones tienen gran probabilidad de ocurrir, dando como resultado final núcleos de helio, radiación electromagnética y neutrinos.

La presión fuera del núcleo es relativamente baja de tal forma que ya no se produce fusión nuclear, pero es lo suficientemente alta como para no permitir movimientos de masa. Solamente los fotones pueden moverse y aun así lo hacen con mucha dificultad, debido a que son absorbidos y reemitidos muchas veces, es decir, su camino libre medio es bastante pequeño. Un fotón tarda del orden de  $\sim 10$  millones de años en atravesar una distancia equivalente a medio radio solar (en el vacío tardaría poco más de un segundo en recorrer la misma distancia). De esta forma, en los primeros  $0.7$  radios solares ( $R_{\odot}$ ) los fotones son los únicos que pueden transportar energía, a esta región (de  $0.25$  a  $0.7 R_{\odot}$ ) se le llama zona de radiación.

Al llegar a los  $0.7 R_{\odot}$  la radiación ya no es un mecanismo eficiente de transporte de energía. La temperatura (y por tanto la presión) de los gases a esa distancia ha disminuido lo suficiente como para generar un gradiente de temperatura que permite el movimiento macroscópico de masas o convección. La convección en el Sol es una inestabilidad: una vez que una burbuja de material empieza a moverse hacia arriba, no se detiene, mientras sea más ligera que el material a su alrededor. Estos movimientos forman celdas convectivas de tamaños variables, desde varios cientos de kilómetros hasta décimas del

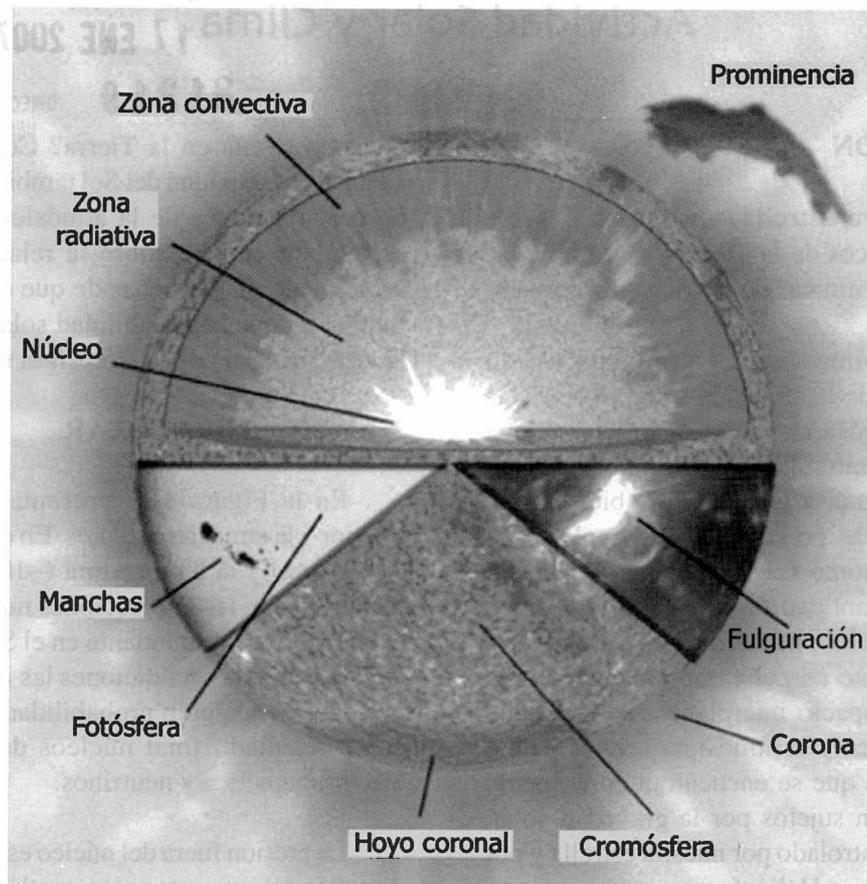


Fig. 1. Estructura del Sol.

radio solar. A esta región se le llama zona convectiva y va desde 0.7 hasta  $1 R_{\odot}$ .

La atmósfera solar inicia en la Fotosfera. Cuando se observa la Fotosfera con telescopios de gran resolución, las celdas convectivas aparecen como gránulos (ver Figura 2). Debido a las diferencias de temperatura el centro del gránulo se ve más brillante (material caliente subiendo) que la orilla (material frío bajando). Las celdas convectivas más grandes aparecen como conjuntos de celdas pequeñas con una frontera común.

La mayor parte de la energía que llega a la Fotosfera desde las capas inferiores es radiada en longitudes de onda que corresponden a la parte "visible" del espectro. La temperatura en la Fotosfera es de unos 5700 grados Kelvin (K) y su espectro de radiación es prácticamente igual al de un cuerpo negro a esa temperatura. Tiene aproximadamente 500 km de espesor. Cuando se observa detenidamente, se ven unas regiones oscuras o manchas solares (ver Figura 3).

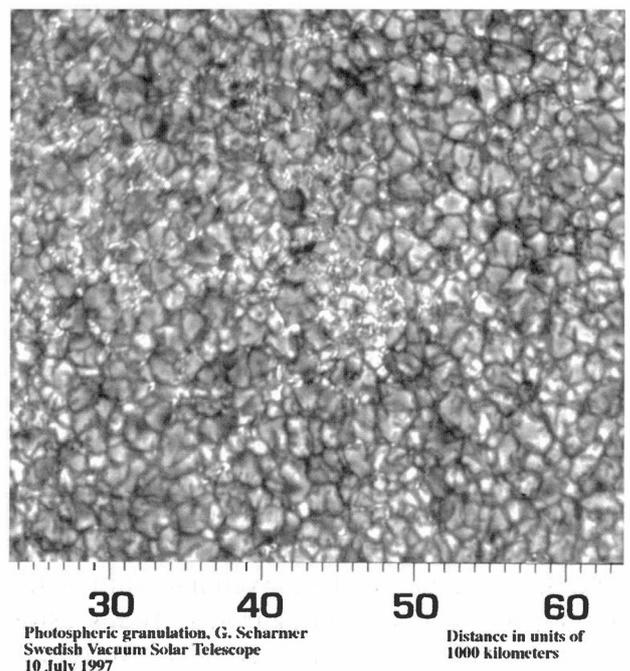
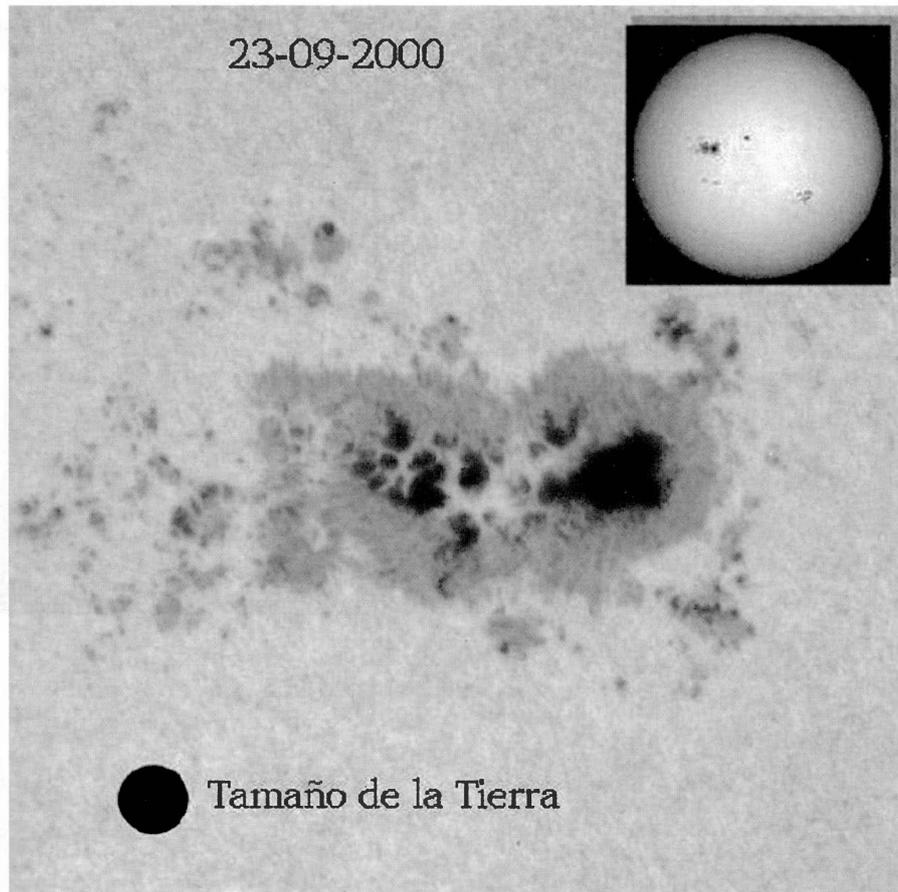


Fig. 2. Granulación fotosférica.



*Fig. 3. La Fotosfera mostrando manchas solares y el patrón de granulación. En la esquina inferior izquierda se presenta el diámetro terrestre para comparación.*

El número de manchas se ha registrado desde hace mucho tiempo y sus variaciones se conocen bastante bien, aunque aún no se han comprendido del todo (ver Figura 9). Las manchas son la manifestación visible de enormes tubos de flujo magnético que cruzan la Fotosfera desde la zona de convección hacia la atmósfera superior. La magnitud de los campos magnéticos en las manchas solares es miles de veces mayor que los de la atmósfera circundante y dificultan la circulación del plasma a través de ellos, de tal forma que el material dentro de los tubos de flujo magnético se mantiene aislado del resto del gas y tiende a enfriarse. A pesar de que la diferencia de temperatura entre el material dentro y fuera de las manchas es relativamente pequeña (cientos de grados) la radiación es menor dentro de las manchas y en contraste, al observador le parecen regiones oscuras. Rodeando a las manchas frecuentemente hay regiones muy brillantes llamadas fáculas. Las fáculas también poseen intensos campos magnéticos. Al conjunto de manchas y fáculas se le conoce como Región Activa.

A una altura de unos 500 km por encima de la Fotosfera la temperatura alcanza su valor mínimo, de unos 4400 K. Esta disminución de temperatura se debe principalmente a las pérdidas por radiación. Esta región marca el límite superior de la Fotosfera. Después de este límite la temperatura aumenta primero suavemente hasta alcanzar unos 6000 K a alturas que van aproximadamente de los 1000 a los 2000 km.

Durante un eclipse solar, esta región de temperatura "intermedia" se ve como un anillo de color rojo que rodea la fotosfera y se le llama Cromosfera o esfera de color. La Cromosfera se puede observar muy bien en dos líneas espectrales, una del hidrógeno, llamada H y una de helio (10830Å). En la Cromosfera se presenta un fenómeno parecido a las llamas de una hoguera, el material cromosférico caliente sube y suponemos que el frío baja, aunque no lo vemos. Estas enormes llamaradas se llaman espículas (ver Figura 4a). También se observan en esta región las llamadas playas

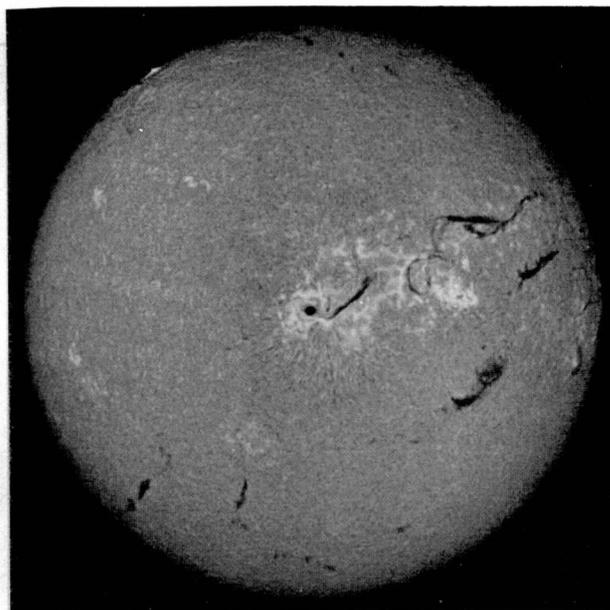


cromosféricas que son regiones brillantes que están encima de las fáculas fotosféricas y por tanto están también dominadas por los campos magnéticos (ver Figura 4b).

Otro fenómeno magnético que resulta evidente en las observaciones cromosféricas son los filamentos. Estos son tubos helicoidales (que recuerdan la estructura de una cuerda) de plasma y campo magnético. Aparentemente, se forman en la Cromosfera y se expanden hacia las capas superiores llevando consigo el material cromosférico (ver Figura 4b).

A una altura de unos 2300 km, la temperatura sube rápidamente desde unos 20 000 K hasta alcanzar un valor de millones de grados; este hecho constituye uno de los fenómenos más interesantes de la Física Solar y hasta el momento no contamos con una explicación clara de los procesos que tienen lugar en la llamada Zona de Transición en donde bruscamente la densidad desciende y la temperatura aumenta.

Después de los 2300 km, la razón de crecimiento de la temperatura, que alcanza millones de grados, y



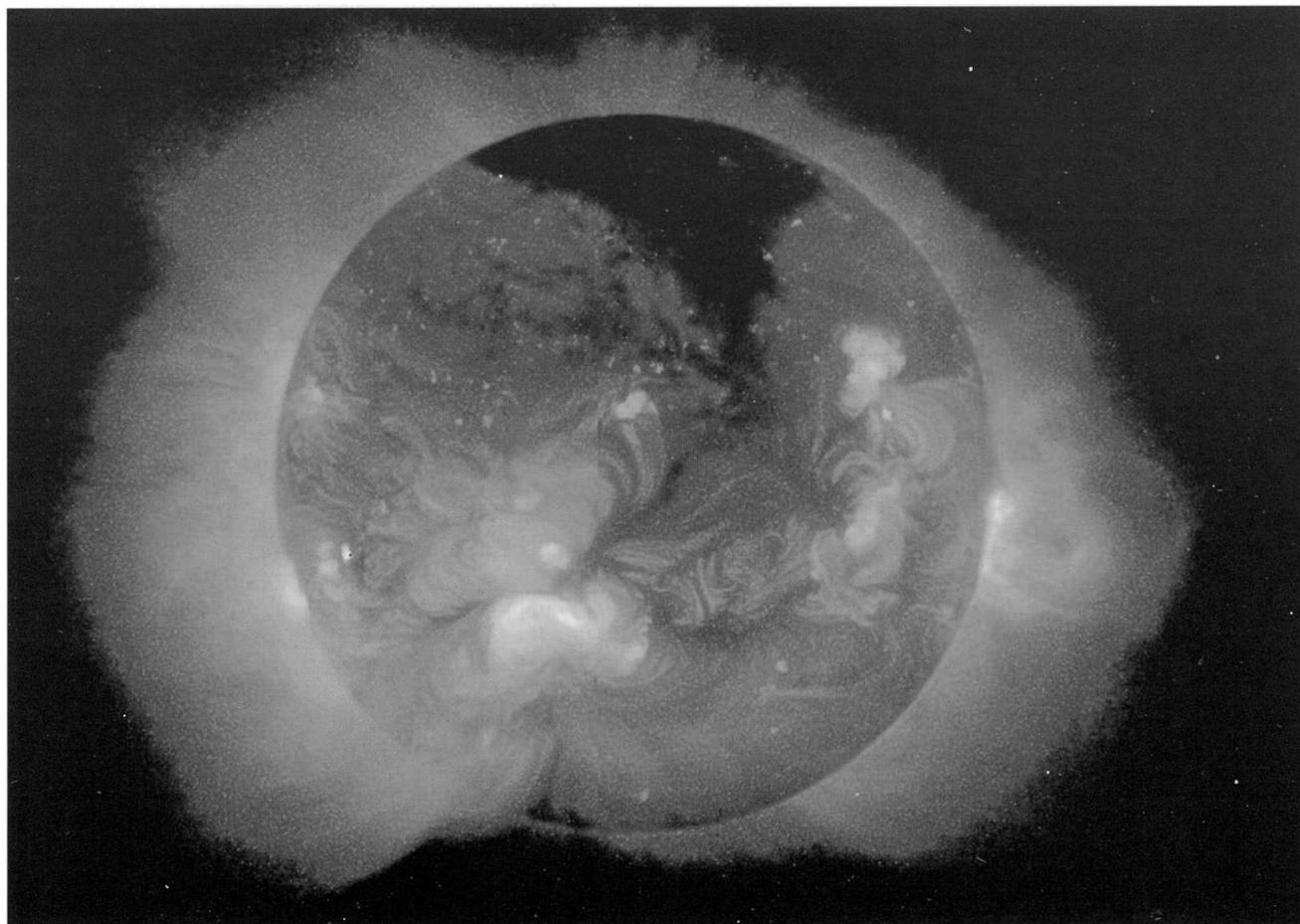
*Fig. 4b (arriba). Las regiones brillantes son las playas y las cuerdas oscuras son los filamentos.*

*Fig. 4a (izquierda). Espículas en la Cromosfera.*

de decrecimiento en la densidad se reduce. A esta región la llamamos Corona solar, dado que en los eclipses solares se aprecia como una aureola blanca que rodea al disco solar. A temperaturas coronales los átomos se encuentran altamente ionizados y se emiten principalmente en ultravioleta y rayos X.

Las regiones coronales más brillantes en la Figura 5 corresponden a las regiones activas, en donde el campo magnético y la densidad son más altos que en el resto de la corona. Además, como se aprecia, los campos magnéticos tienen una estructura cerrada.

En contraste con las regiones brillantes en la Figura 5, se encuentran las regiones oscuras como la que se ve en el polo norte solar en esa misma figura. Por razones obvias a estas regiones se les llama Hoyos Coronales y presentan un campo magnético abierto. Es decir, las líneas de campo no se cierran inmediatamente; de hecho suponemos que se cierran muy lejos, al menos en la frontera de la Heliosfera que se supone que se encuentra a unas 100 unidades astronómicas (UA) (1 UA es la distancia promedio Sol-Tierra =  $1.5 \times 10^{11}$  m). Por lo tanto, el material



*Fig. 5. La Corona Solar mostrando regiones activas (brillantes) y Hoyos Coronales polares (grandes zonas oscuras).*

coronal puede escapar fácilmente expandiéndose hacia el medio interplanetario y formando lo que se conoce como viento solar.

De los Hoyos Coronales salen haces de viento solar con velocidad más alta que en otras regiones de tal forma que, cuando un hoyo coronal se encuentra en latitudes bajas y de frente a la Tierra, en nuestro planeta se observa días después su influencia. Si ese hoyo coronal permanece en las mismas latitudes por varios meses, su influencia será recurrente, con un periodo aproximado de 27 días, que es el periodo de rotación solar.

Además, en el Sol se generan fenómenos transientes que son básicamente explosiones provocadas por aniquilamiento de campos magnéticos de diferentes polaridades que se encuentran. Pueden ser fulguraciones, eyecciones de masa coronal (EMC) o prominencias; estas últimas no son otra cosa que los filamentos que se expanden

de la cromosfera a la corona y vistos en el limbo solar se observan como arcadas gigantes. En ocasiones se dan todas juntas.

Al interaccionar el viento solar, o algún otro tipo de transientes con el campo magnético terrestre, éste se deforma creando una cavidad conocida como la Magnetosfera y además se origina la actividad geomagnética. En la Figura 6 se esquematiza esta interacción.

Por último mencionaremos que nuestra estrella tiene un campo magnético generado en la zona convectiva, el cual es la causa de la actividad solar. En el transcurso del ciclo de 11 años de manchas solares, este campo pasa de una topología bipolar al inicio del ciclo (cerca del mínimo de actividad), a una toroidal (4 ó 5 años después cerca del máximo de actividad), recuperando la poloidal en los 5 ó 6 años siguientes en el mínimo del nuevo ciclo, pero con una polaridad inversa. Para que la componente

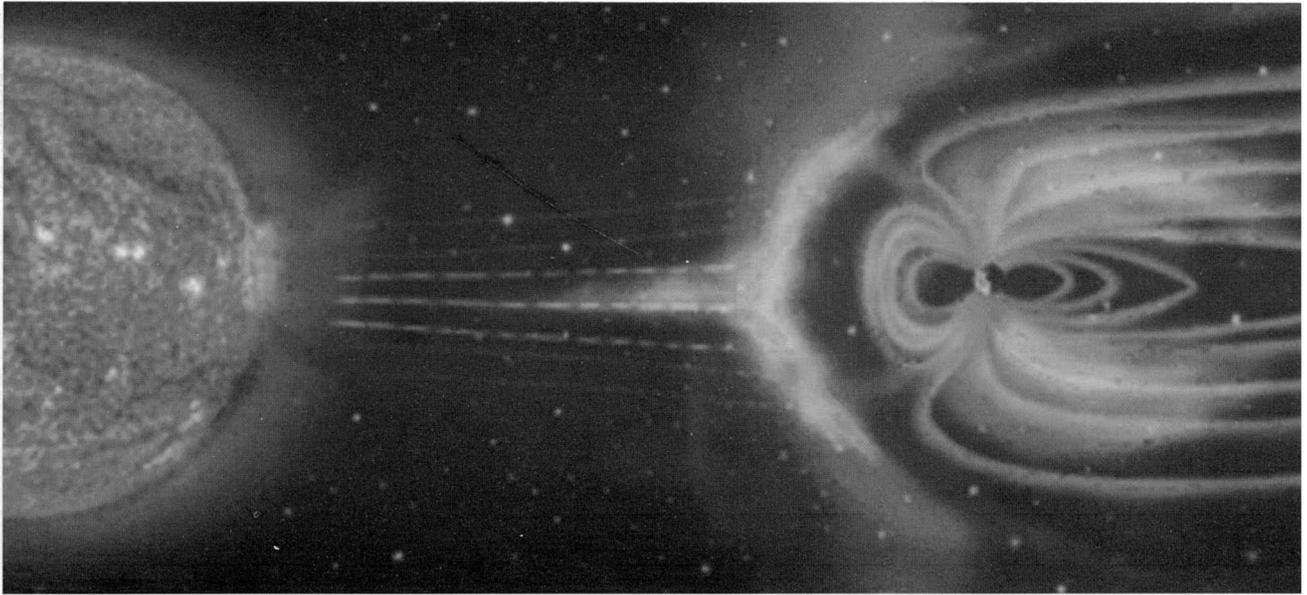


Fig. 6. La cavidad magnética terrestre o Magnetosfera, deformada por la interacción con los productos solares.

bipolar recobre la misma polaridad necesitan transcurrir otros 11 años; es por esto que se considera que el ciclo magnético solar es de 22 años.

### 3. INDICADORES TERRESTRES DE LA ACTIVIDAD SOLAR

Tenemos registros y archivos en la Tierra que dan cuenta de la actividad solar a lo largo del tiempo. Estos son de dos tipos: los históricos y los de más largo plazo. A continuación veremos cuáles son.

#### 3.1 Indicadores históricos de la actividad solar

Para conocer cómo ha sido la variabilidad de nuestra estrella podemos buscar en el pasado información sobre la actividad del Sol. Los registros escritos, o como son llamados más comúnmente, históricos, que nos indican la variabilidad del Sol, son principalmente de tres tipos:

- 1) La descripción de la forma de la corona solar durante los eclipses totales de Sol.
- 2) Las observaciones de las manchas solares.
- 3) Las auroras.

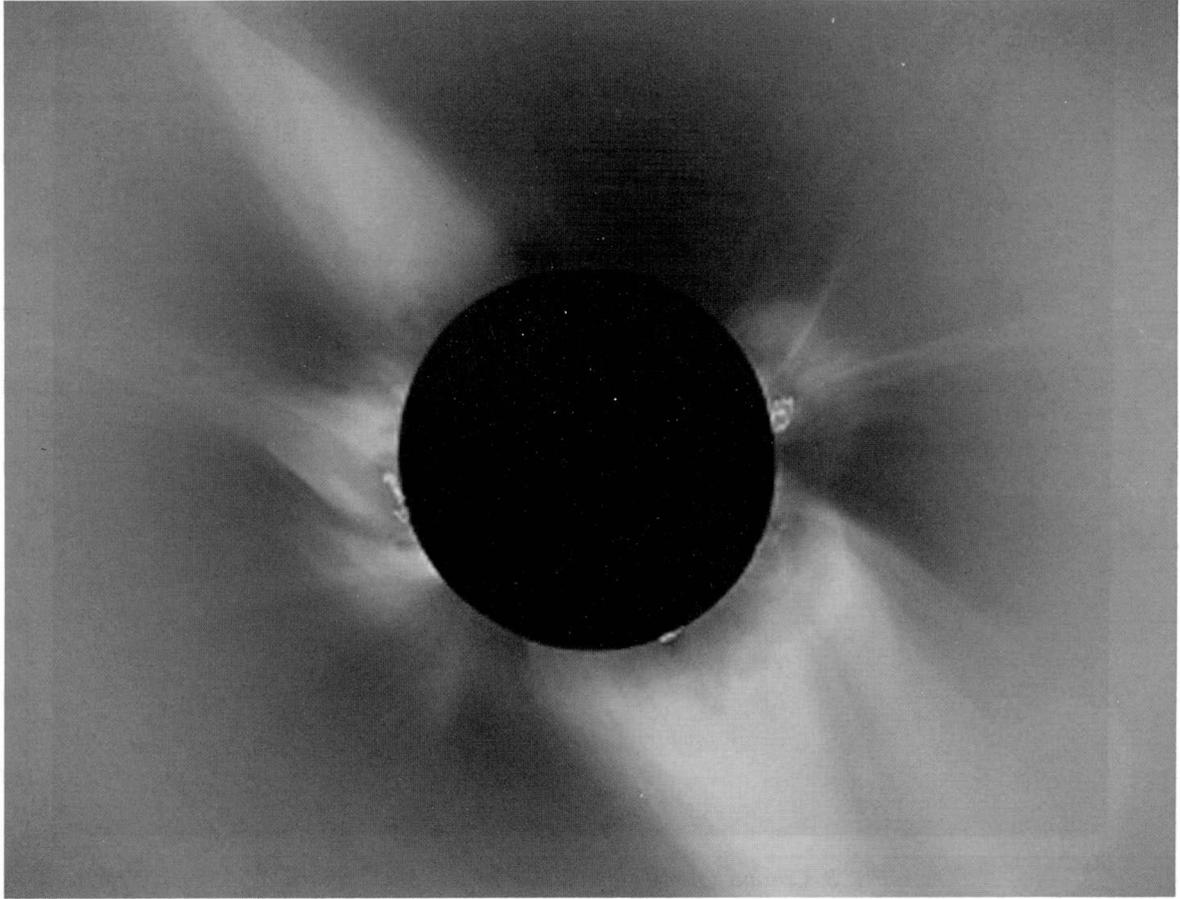
##### 3.1.1 Observando la Corona Solar

Hasta el advenimiento de la era espacial, la corona del Sol sólo se podía observar desde la Tierra cuando ocurría un eclipse total de Sol.

Normalmente no podemos observar la corona a simple vista debido a que la luz que emiten la Fotosfera, y en menor medida la Cromosfera, la opacan. La luz blanca que se observa en un eclipse es la luz proveniente de la Fotosfera, que es dispersada por dispersión Thompson por las partículas de la corona. Cuando hay un eclipse total de Sol, el disco de la Luna, que por una afortunada coincidencia observado desde la Tierra, tiene aproximadamente el mismo tamaño aparente que el disco solar, cubre al Sol permitiendo que sólo la corona quede visible. La forma de la corona varía con la actividad del Sol.

En el mínimo de actividad, debido a la existencia de los hoyos coronales polares se observa que la corona tiene unas estructuras en el ecuador que semejan dos pétalos (Figura 7), los llamados *casco coronales*. Cuando el Sol está más activo la corona se observa muy brillante y homogénea, debido a la ausencia de los hoyos coronales polares y a la aparición de numerosas estructuras de campo magnético cerrado como lo muestra la Figura 8.

Las observaciones sistemáticas de la corona durante los eclipses totales de Sol se han llevado a cabo desde 1706. Las observaciones previas a este siglo son muy escasas en Europa, y no porque no hubiera eclipses, sino porque su ocurrencia se dio en áreas muy poco pobladas. De hecho, sólo se tienen cuatro referencias de los años 1560, 1567, 1606 y



*Fig. 7. Corona solar en el mínimo de actividad solar.*

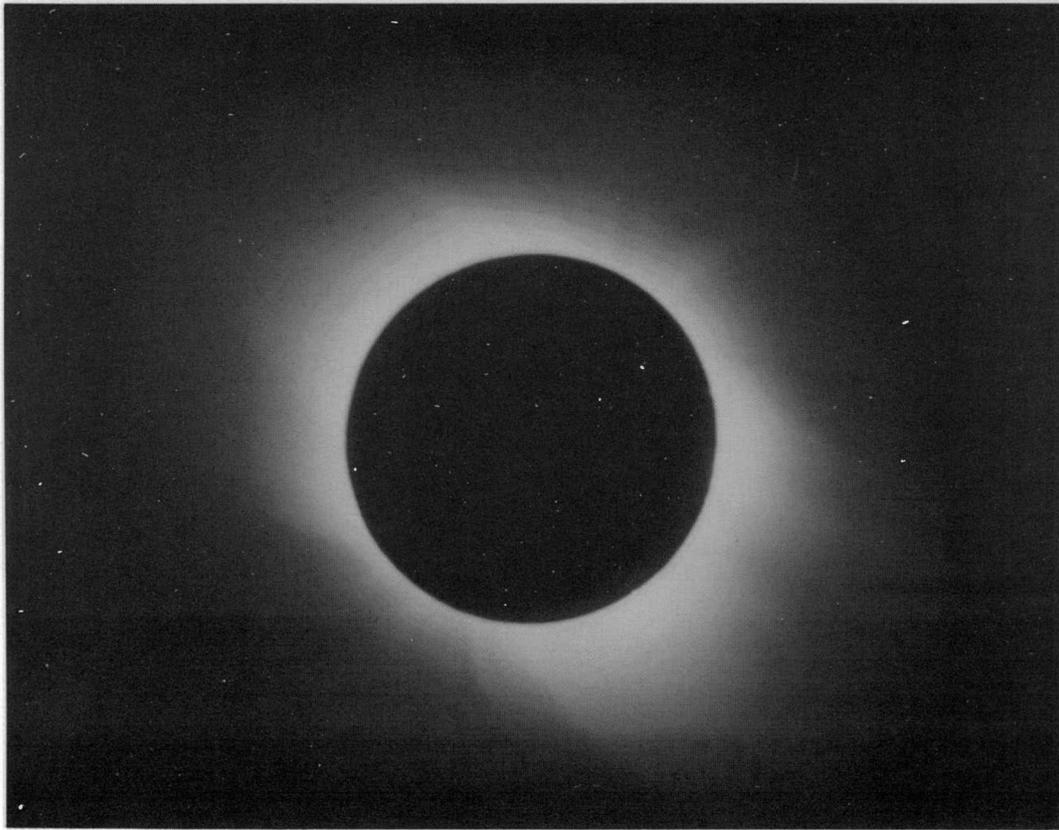
1652, que no ofrecen detalles sobre la forma que asumió la corona. En épocas anteriores los testimonios son muy vívidos y detallados, pero sólo en cuanto a los efectos aterradores que la repentina oscuridad provocaba entre la gente. En Europa sólo uno observado en 968, menciona a la corona. De aquí que la información que esta clase de registros nos puede dar sobre la pasada actividad del Sol es de valor muy limitado.

### *3.1.2 Las manchas del Sol*

La manifestación más evidente que se tiene de la actividad del Sol son sus manchas, ya que se pueden observar a simple vista. Son, por lo tanto, la fuente más antigua de los registros directos de la historia de la actividad solar. En el mundo occidental, los griegos dan noticias de ellas desde el año 28 a.C., el curioso observador fue un discípulo de Aristóteles, Teofrasto de Atenas. Posteriormente la observación de las manchas solares cayó en desgracia en Occidente, ya que uno de los dogmas de la Iglesia

católica era que el Sol, siendo creación divina, era una esfera perfecta, y punto importante, inmaculada. Las manchas solares por lo tanto, fueron eliminadas por bula papal. Fue Galileo, en 1610, quien al construir un telescopio y enfocarlo al Sol las redescubrió. Por cierto, debido a la observación directa del Sol, Galileo se dañó un ojo.

Las observaciones de Galileo provocaron que el estudio de las manchas en los países europeos cobrara auge; de hecho desde el siglo 17 sólo ha habido un año en el que no se informó sobre las manchas. Su comportamiento cíclico no fue notado sino hasta 1843, lo cual, dicho sea de paso, es fuente de escarnio para los astrónomos y demás estudiosos de los cielos ya que se contaba con casi dos mil años de observaciones, y nadie aparentemente advirtió esta regularidad tan evidente. Él que realizó tal descubrimiento fue el boticario alemán Heinrich Schwabe, quien se basó en el estudio de 17 años de sus observaciones. Poco después de este descubrimiento, los astrónomos profesionales se



*Fig. 8. Corona solar en el máximo de actividad (solar).*

dedicaron a ver si este era un ciclo real, mediante un programa de observaciones diarias del número de manchas desde varios lugares de la Tierra. El organizador de esta ambiciosa empresa fue Rudolf Wolf del observatorio suizo de Zurich. Wolf también se dedicó a ver si el ciclo se presentó en el pasado. Después de un cuidadoso trabajo recopiló los datos existentes entre 1610 y 1843, concluyendo que el ciclo de aproximadamente once años estaba presente al menos desde 1700. En la Figura 9 se puede apreciar al número de manchas solares promedio por año de 1750 a 2006. Es evidente que entre mínimo y mínimo (o entre máximo y máximo) de este número de manchas, transcurren aproximadamente once años. Los ciclos solares se consideran de mínimo a mínimo de manchas solares. El ciclo número 1 empezó en 1755 y en 1996 empezó el ciclo 23.

Aparte de este ciclo de once años podemos inferir otros de periodo más largo. Por ejemplo, si tomamos el número máximo de manchas de cada ciclo con respecto al tiempo, los máximos del número de manchas van a presentar una periodicidad de aproximadamente 120 años, el llamado ciclo de Gleissberg, denominado así en memoria de su des-

cubridor. De la misma Figura 9 observamos también que el número máximo de manchas ha ido en aumento sistemáticamente a partir de 1880. Hoy en día, aun durante el mínimo del ciclo de manchas solares, puede observarse media docena de ellas diariamente. En los tiempos de máximo, hay cien o más manchas al día; sin embargo, las cosas no siempre han sido así. Entre 1887 y 1890 los astrónomos Gustav Spörer de Alemania y Walter Maunder de Inglaterra se dieron cuenta de que casi no se informó sobre la presencia de manchas entre 1645 y 1715. A esta aparente ausencia de manchas se le ha denominado mínimo de Maunder. La realidad de este inusitado descenso fue reconfirmada en 1976, cuando el científico estadounidense John Eddy estudió los registros históricos y mostró que en efecto hubo un mínimo anómalo de la actividad solar en esa época. Otro mínimo se observa de 1795 a 1835, es el llamado mínimo de Dalton; finalmente el mínimo Moderno se observa de 1880 a 1930 (véase Figura 9).

Como ya dijimos, desde el año 28 a.C. se cuenta en Occidente con noticias sobre la observación de las manchas solares; sin embargo, éstas no se hacían en forma regular.

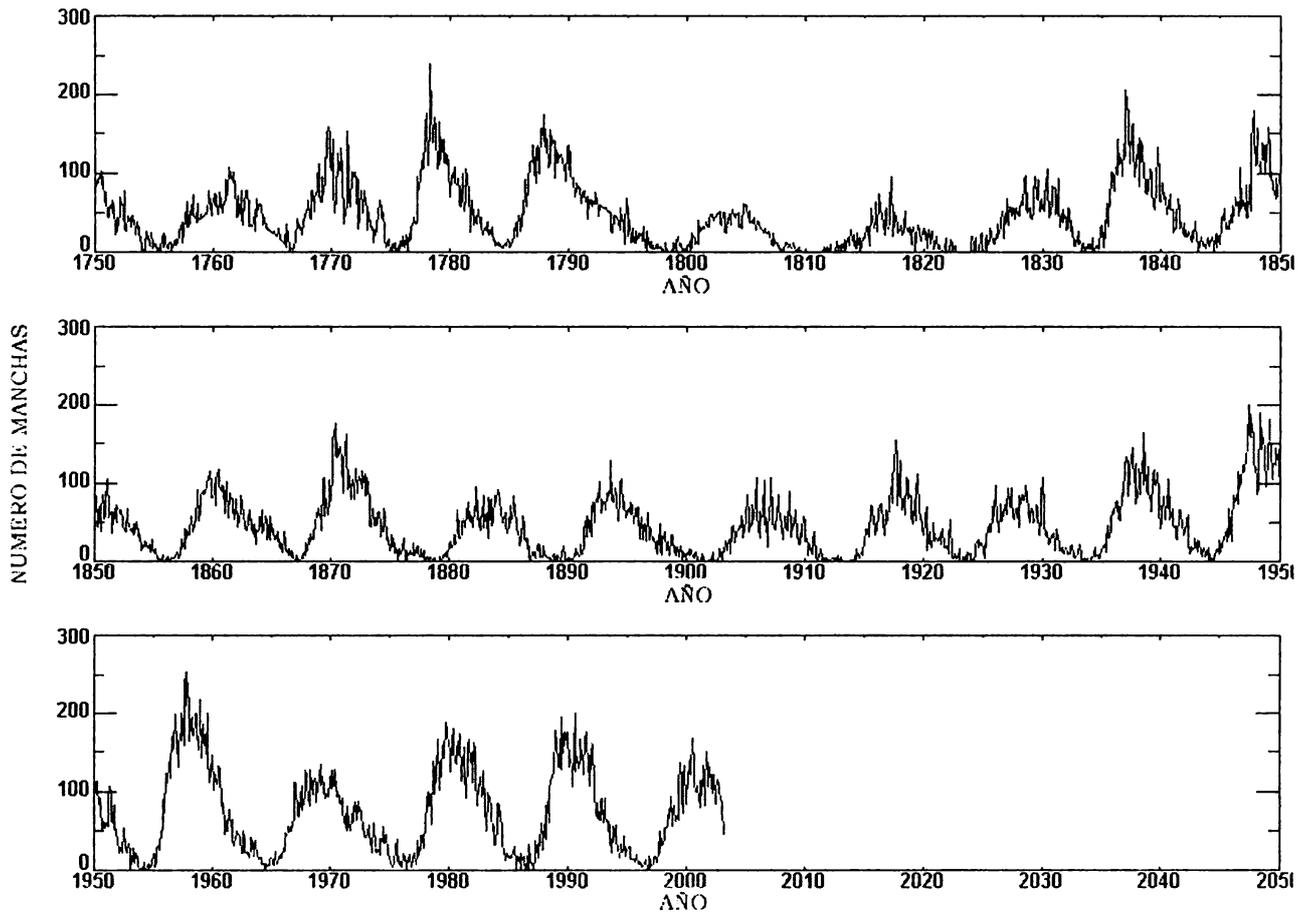


Fig. 9. Promedios anuales del número de manchas solares.

De hecho, el estudio de estos documentos da tres o cuatro observaciones de manchas por siglo en promedio. Del Oriente en cambio, se tienen registros desde la dinastía Han (200 a.C. a 200 d.C.), en cuyos inicios surgió una burocracia dedicada a la observación astronómico-astrológica que mantuvo, a lo largo del tiempo, informado al emperador en turno sobre cualquier portento de los cielos, desde las “estrellas nuevas” (hoy llamadas supernovas) y los cometas hasta la cambiante faz del Sol. De Corea se tiene una información similar, por razones parecidas. En general, las manchas solares eran, para el emperador en turno, signo de que algo andaba mal con su gobierno; entonces las presiones políticas y sociales del momento, no las religiosas, podían influir para que estas señales de los cielos fueran o no suprimidas. Como ejemplo podemos citar lo que ocurrió en China durante la dinastía Chin (25 a.C. a 400 d.C.): cuando el primer emperador de esta dinastía acababa de subir al trono hubo en los cielos muy pocas señales de cualquier clase. Más tarde, conforme la insatisfacción popular contra el régimen creció, se presentaron numerosos eventos celestes.

Esta situación implica que los registros de fenómenos celestes de esas épocas y esos países deben ser tomados con gran cautela. Sin embargo, entre 1640 y aproximadamente 1715, cuando política y socialmente no había razones para suprimir eventos celestiales, no hay manchas reportadas, lo cual concuerda con la época del mínimo de Maunder. Por otro lado, entre 1100 y 1300 se avistaron numerosas manchas sin causa política o social que pudiera hacerlas necesarias.

Con todo y las enormes limitaciones de las observaciones a simple vista, estos testimonios son útiles para informarnos sobre extensos periodos de alta o baja actividad solar.

### 3.1.3 Las auroras

Las partículas energéticas generadas en fulguraciones y la masa de las EMC y del viento solar, ingresan en la alta atmósfera a través de las líneas de campo abiertas en las altas latitudes magnetosféricas, provenientes tanto de la cola magnetosférica como



Fig. 10. Aurora.

de los conos polares. Esta descarga eléctrica interactúa con los átomos atmosféricos produciendo ionización y excitación. Los fenómenos de desexcitación y recombinación de estos átomos producen la luz de colores, con el verde y rojo como los más intensos, que da lugar al hermoso espectáculo de las auroras, principalmente en un anillo oval comprendido entre los 60 y 70 grados de latitud en ambos hemisferios. Los colores verde y rojo se deben a la emisión del oxígeno a longitudes de onda de 5577 y 6300 nm respectivamente (ver Figura 10). La aurora se forma a alturas de 100 m sobre la superficie.

En la Figura 11 se aprecia como el número de auroras sigue de manera general al número de manchas solares. Por tanto, el estudio de los registros aurorales es un medio para estudiar las variaciones en la actividad del Sol.

Como algo tan espectacular como una aurora no pudo pasar desapercibido en ninguna época; se tienen registros de auroras que vienen de Corea y China desde 200 a.C., ya que en oriente a la par que se observaban las manchas solares, por las mismas razones también se registraban las auroras.

### 3.2 Indicadores de largo plazo de la actividad solar

Hasta ahora hemos visto que existen evidencias de que independientemente de las razones culturales,

políticas y sociales, han habido épocas en que la actividad del Sol se encontraba disminuida. Sin embargo, los testimonios que nos permiten vislumbrar este fenómeno cubren cuando mucho un periodo de aproximadamente 2000 años. Sería deseable poder contar con registros en los que las veleidades mundanas no existieran y que se extendieran más allá el tiempo. ¿Existe tal cosa? La respuesta es sí.

#### 3.2.1 Isótopos cosmogénicos

Continuamente nuestro planeta se encuentra bombardeado por partículas muy energéticas que

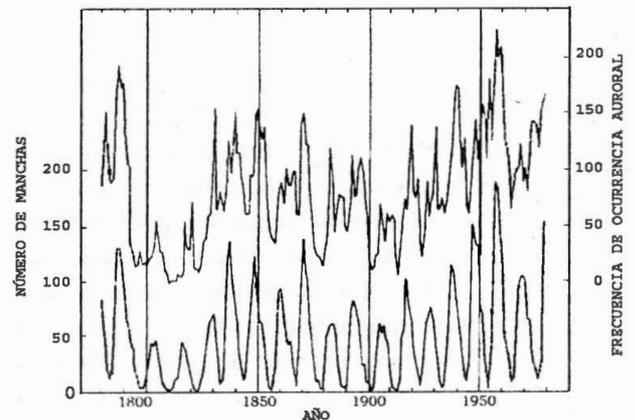


Fig. 11. Variación de la frecuencia auroral (curva superior) y las manchas solares (curva inferior).

proviene de fuera de la Heliosfera, conocidas como *rayos cósmicos*. Estas partículas son principalmente protones y como están cargados eléctricamente, interactúan primero con el campo magnético interplanetario y después con el terrestre. En particular, las irregularidades del campo magnético interplanetario actúan como obstáculos al flujo de los rayos cósmicos. Durante el máximo de actividad solar el campo magnético presenta muchas irregularidades y por tanto menos rayos cósmicos penetran en nuestro planeta. En el mínimo la situación es la opuesta.

Una vez que las partículas que forman los rayos cósmicos ingresan en nuestra atmósfera, interactúan con los núcleos atómicos ahí presentes produciendo una gran variedad de otros núcleos llamados cosmogénicos por haber sido generados por partículas del cosmos exterior a nuestra Heliosfera. Muchos de estos núcleos son isótopos radiactivos. Después de que los radioisótopos son producidos, siguen el movimiento de las masas de aire convertidos en gases, tal es el caso del  $C^{14}$ , o se adhieren a partículas de tamaño de micras, los denominados aerosoles; tal es el caso del radioisótopo  $Be^{10}$ . Estos isótopos bajan hasta la parte inferior de la atmósfera, la que está en contacto con los seres vivos. Una vez allí, los isótopos adheridos a los aerosoles se incorporan al suelo por medio de la lluvia, mientras que los gases se depositan directamente en el mar o en los seres vivos.

Los isótopos con mayores razones de producción son:  $C^{14}$ ,  $Be^{10}$  y  $Be^7$ .

### 3.2.2 Archivos terrestres de la actividad solar

Para poder hacer uso de la información que nos pueden proporcionar los isótopos cosmogénicos tenemos que encontrar los lugares donde esté almacenada esta información. Para el  $C^{14}$  la información confiable se remonta hasta aproximadamente 10 000 años en el pasado, para el  $Be^{10}$  y otros isótopos hasta 1000 años en el pasado.

Estos lugares o archivos son:

1) *Capas polares y glaciares*. El hielo se forma de la precipitación de nieve y ésta se va comprimiendo en capas que se acumulan a lo largo del tiempo. En la época actual se extraen unos cilindros de hielo de varios metros de profundidad en los que

pueden estudiarse características tales como la composición y el espesor de las capas de hielo. Aquí se deposita principalmente el  $Be^{10}$  y el  $Cl^{36}$ .

- 2) *Los sedimentos de las profundidades marinas y los lagos*. Los isótopos que nos dan información son el  $Be^{10}$ , el  $Al^{26}$  y el  $O^{18}$ . Llegan al mar directamente por la precipitación de los aerosoles a los cuales están adheridos o por el viento y los ríos que transportan los aerosoles de los continentes hacia el mar o hacia grandes lagos.
- 3) *Los anillos de los árboles*. Durante la fotosíntesis, el  $CO_2$  atmosférico y el agua son absorbidos por los vegetales. El  $CO_2$  contiene  $C^{14}$ , por lo que el análisis de su abundancia en las diferentes capas de los anillos de los árboles que se van formando anualmente permite estudiar indirectamente el flujo de los rayos cósmicos.
- 4) *Celulosas de plantas*. El  $C^{14}$  producido por los rayos cósmicos en forma de bióxido de carbono es absorbido por las plantas y preservado como celulosa.
- 5) *Meteoritos caídos en la Tierra*. Los meteoritos son expuestos a los rayos cósmicos en el medio interplanetario, por tanto la producción de isótopos no es afectada por procesos terrestres, como ocurre con los otros registros. Se pueden medir abundancias desde hace  $4.6 \times 10^9$  años.

En la Figura 12 se grafica la variación de la concentración de  $Be^{10}$  para varios siglos. Observamos períodos de gran producción que corresponden a baja actividad solar, tales como los ya mencionados mínimos de Maunder, alrededor de 1700, el de Dalton alrededor de 1800 y el Moderno alrededor de 1880, bien identificados también en manchas solares. Otra época de gran producción, y por tanto baja actividad solar, aparece entre 1418 y 1535, de la cual no había referencias de manchas solares, se le conoce como el *mínimo de Spoerer*.

### 3.2.3 El modulador secular de la concentración de $^{14}C$

El mecanismo que afecta la variación en la concentración de los isótopos radiactivos a largo plazo es de origen terrestre: la variación del momento magnético de la Tierra. El campo magnético terrestre, como primera aproximación, es muy parecido al de

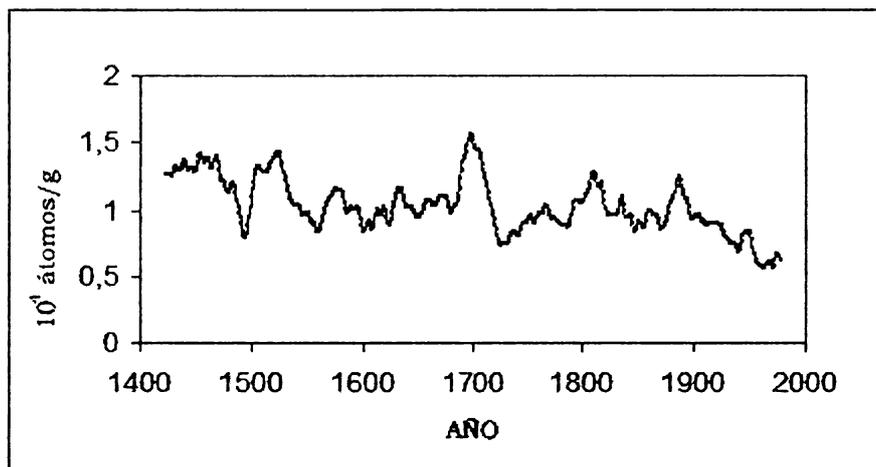


Fig. 12. Variaciones temporales del  $Be^{10}$ .

un dipolo. Este campo actúa como un escudo que dificulta la entrada de partículas cargadas a la atmósfera terrestre, ya sea que estas partículas provengan del viento solar, de fulguraciones o de rayos cósmicos. Si la intensidad de este campo disminuye, lo que es equivalente a decir que el momento magnético disminuye, habrá más partículas que puedan penetrar y, por lo tanto, mayor producción de isótopos cosmogénicos. El efecto inverso se da cuando la intensidad del campo magnético aumenta.

En la Figura 13 se observa la variación a lo largo de 7000 años de la concentración del  $C^{14}$ . La figura tiene la escala invertida para la concentración de  $C^{14}$ ; la curva con trazo más grueso indica la variación de la concentración de este isótopo debida al cambio en la intensidad del momento magnético, la curva con trazo más delgado es un ajuste a la curva gruesa. Observamos que al retroceder hacia el pasado, la concentración primero disminuye, hasta llegar a un mínimo alrededor del año 450 de nuestra era, lo que indica que la intensidad del campo magnético iba en aumento, provocando una caída en la concentración del  $C^{14}$ . Hacia el año 5000 a.C., la intensidad magnética disminuyó con el consecuente aumento en la concentración del multicitado isótopo.

Además de la tendencia global en los aumentos y disminuciones del  $C^{14}$ , vemos múltiples desviaciones a más corto plazo en la curva gruesa. Estas desviaciones son las que podríamos achacar a la actividad solar. En la Figura 13 se pueden identificar el mínimo de Maunder y el de Spoerer caracterizados por un aumento en la concentración del  $C^{14}$ , así como un máximo solar en el siglo 12 identificado por una disminución de la concentración del  $C^{14}$ . Cabe hacer notar

que el brusco aumento de la concentración observada en el  $C^{14}$  cerca de 1950 pudiera deberse a la quema del carbón vegetal que se inició a gran escala con el inicio de la actividad industrial a fines de siglo 19.

Se podría tratar de ir más lejos en el pasado y ver qué otros máximos y mínimos de actividad solar se identifican. Los resultados aparecen en la Tabla 1. Los sugestivos nombres dados a estos periodos nos hablan de la época histórica en la que ocurrieron, con excepción de los de Spoerer, Maunder y Dalton, que hacen honor a su descubridores. En la Tabla 1 se observa que al menos en los últimos 3000 años los cambios seculares de la actividad solar no han presentado algún patrón cíclico.

### 3.2.4 El ciclo solar en el pasado remoto

El estudio de sedimentos lacustres nos puede remontar muy atrás en el pasado. El medio son unas rocas de lodo rojo y arena muy fina conocidas con el

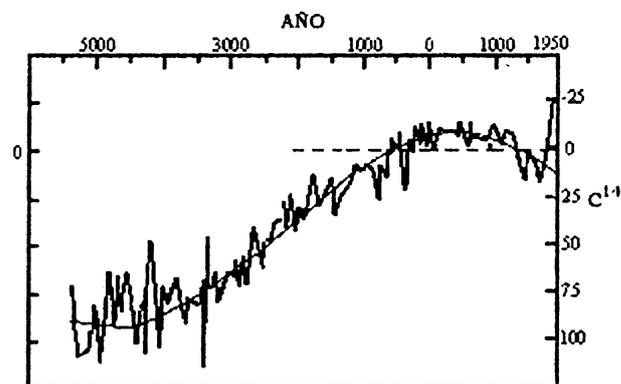


Fig. 13. Variaciones en la concentración de  $C^{14}$  debidas al campo geomagnético.

nombre de formaciones de Elatina, que están constituidas por capas cuyo grosor nos puede indicar variaciones en los valores promedio anuales de la temperatura. La información que nos proporcionan se remontan a 680 millones de años en el pasado. La Tierra, en la época en que estas rocas se formaron, estaba pasando por una etapa de frío intenso, a tal grado que en las regiones ecuatoriales, donde hoy la temperatura oscila entre 26 y 28°C, el suelo estaba cubierto de hielo durante todo el año. No había plantas sobre la superficie y la única vida consistía en algas primitivas y bacterias. En lo que ahora es el sur de Australia había grandes lagos que recibían periódicamente el agua de los glaciares derretidos en el verano. Esta agua contenía sedimentos que se depositaban en el lecho del lago. El volumen de las aguas provenientes de los glaciares variaba según la temperatura y esto hizo que el grosor de los estratos lodosos depositados variara. Fue así como se constituyó la formación de Elatina. Cuando esta era glacial terminó y la temperatura ascendió, el hielo derretido formó mares que cubrieron la formación de Elatina. Movimientos subsecuentes de tierra y erosión volvieron a exponer los depósitos de Elatina permitiendo que hoy podamos estudiarlos.

En la Figura 14 aparece una sección de Elatina. Las láminas o estratos individuales tienen un grosor que va de 0.2 hasta 3 mm, los estratos forman a su

**Tabla 1**

Algunos periodos de máxima y mínima actividad solar en el pasado a partir de la concentración de  $C^{14}$  en los anillos de los árboles

Evento	Duración aproximada
Máximo sumerio	2720-2610 a.C.
Máximo piramidal	2370-2060 a.C.
Máximo de Stonehege	1870-1760 a.C.
Mínimo egipcio	1420-1260 a.C.
Mínimo homérico	820-640 a.C.
Mínimo griego	440-360 a.C.
Máximo romano	20 a.c.-80 d.C.
Mínimo medieval	640-710 d.C.
Máximc medieval	1120-1280 d.C.
Mínimo de Spoerer	1400-1510 d.C.
Mínimo de Maunder	1640-1710 d.C.
Mínimo de Dalton	1795-1825 d.C.
Máximo moderno	Empezó en 1930

vez grupos de 10 a 14 laminaciones. El grosor de las laminaciones varía de manera similar en cada grupo, alcanzando un máximo para la formación que está aproximadamente en el centro del grupo. Además cada grupo está usualmente limitado al principio y al final por bandas oscuras que son laminaciones más delgadas y con mayor cantidad de arcilla que las centrales.

Esto lo podemos interpretar observando lo que pasa en los lagos modernos, formados de glaciares derretidos. Durante la primavera y verano las aguas provenientes de los hielos derretidos llevan abundante materia a los lagos. Las aguas derretidas son más frías y por tanto más densas que las aguas del lago, y se hunden depositando en el lecho del lago una capa de lodo y arena; sin embargo, el material más fino, que además es más arcilloso y oscuro, se queda suspendido en la superficie del lago. En los meses posteriores este material también se depositará en el fondo del lago.

Si las capas de la formación de Elatina tuvieron un origen similar a las capas depositadas en los lagos modernos, es decir, si reflejan el volumen de las aguas formadas por los hielos derretidos que llenaron periódicamente el lago, entonces estas laminaciones nos indican la temperatura promedio de cada verano a lo largo de aproximadamente 1800 años hace más o menos 680 millones de años.

Para poder estudiar este archivo de temperaturas se extrajo en 1982 del sur de Australia un cilindro de 10 metros de largo. Se compararon los grosores de la distribución de las capas de Elatina con los del registro de manchas solares. Lo sorprendente es que ambos registros presentan periodos de aproximadamente 11 y 100 años. Adicionalmente, el registro de Elatina presenta una periodicidad de 22 años, que es la misma que la del ciclo magnético del Sol. Esas similitudes con los ciclos de variación de la actividad solar nos indican que puede haber una conexión directa entre la variabilidad climática y la actividad del Sol. En otras palabras, podemos pensar que un incremento en la actividad solar causó un incremento en la temperatura terrestre, que a su vez provocó una mayor precipitación pluvial anual y, por tanto, una mayor cantidad de materia depositada en los antiguos lagos.

Estos resultados nos llevan a preguntarnos cómo pudo el Sol afectar tan directamente el clima de la Tierra en esas épocas remotas, cuando que hoy es

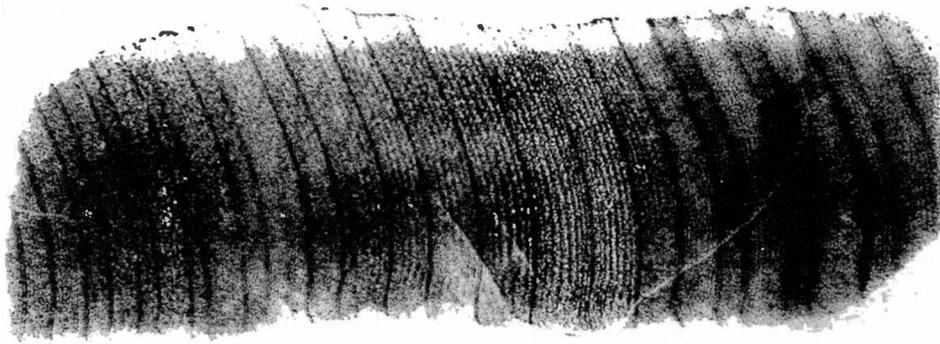


Fig. 14. Laminaciones de una sección de la formación de elatina.

bastante más difícil encontrar los rastros del ciclo de actividad solar en nuestros patrones climáticos.

Una posible explicación tiene que ver con el campo magnético terrestre, que como ya mencionamos anteriormente, sirve como un escudo que protege al planeta de la entrada de partículas energéticas y plasma. También vimos que la intensidad de ese campo disminuye periódicamente, y precisamente hace más o menos 700 millones de años, su intensidad era 10% menor que la actual, de modo que ese campo de menor intensidad permitió a las partículas y plasma solar penetrar en la atmósfera a niveles mucho más profundos que los actuales, provocando que la influencia del ciclo solar en el clima fuera mucho mayor de lo que es hoy. Otra posible explicación tiene que ver con la composición atmosférica de esa época remota. Los estudios realizados sobre la atmósfera primitiva de la Tierra indican que antes de que la vida vegetal empezara a liberar oxígeno como uno de los productos de la fotosíntesis, el contenido de ese elemento en la atmósfera era una pequeña fracción del actual. Ese contenido menor permitió a la radiación ultravioleta solar penetrar más profundamente dentro de la atmósfera antes de ser absorbida por el poco oxígeno presente, el cual al convertirse en ozono formó un estrato a una altura menor a la que se encuentra hoy en día.

La capa de ozono es directamente controlada por la actividad solar, y estando ésta a una altura menor, su interacción con la troposfera debió ser mayor, afectando de ese modo los patrones climáticos más fuertemente que en la actualidad.

### 3.2.5 La actividad solar presenta ciclos menores que el de 11 años

De los análisis llevados a cabo por diferentes investigadores sobre la variación en el número de

manchas solares, también se ha observado que existen ciclos adicionales de 1.3-1.7, 2.1, 3, 5.4, 7 y 8 años. Algunos de estos ciclos se pueden relacionar claramente con fenómenos específicos de la actividad solar, para otros la causa no es clara. Por ejemplo el de 1.3-1.7 años está relacionado con el transporte de energía en la zona convectiva del Sol hacia la superficie.

La conclusión más importante que podemos sacar de todos los resultados arrojados por los diversos registros que tenemos en la Tierra sobre los ciclos de variación de la actividad solar es que desde hace casi 700 millones de años, el ciclo de actividad del Sol ha sido aproximadamente el mismo. Por lo cual podemos pensar que su actividad es relativamente estable aunque presenta de vez en cuando variaciones. No obstante, éstas, dado que ocurren en escalas de tiempo importantes para el ser humano y la compleja sociedad que ha construido, tal vez puedan afectar el clima terrestre y aunque desde el punto de vista solar son variaciones sin mucha importancia, para nosotros en este pequeño planeta pueden significar desastres mayores.

## 4. EFECTOS DE LA IRRADIANCIA SOLAR EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE

El Sol emite varios productos que impactan a nuestro planeta, estos son:

- Radiación electromagnética.
- Neutrinos.
- Partículas de alta energía provenientes de la onda de choque asociada a una EMC rápida, a una fulguración u otros eventos transitorios.
- Emisiones transitorias de plasma que viene de EMC y otras estructuras corales de corta vida.
- Emisiones continuas de plasma, el Viento Solar: emisiones de viento solar rápido ( $>400 \text{ km s}^{-1}$ )

proveniente de las regiones centrales de los hoyos coronales y de viento solar lento ( $<400 \text{ km s}^{-1}$ ) proveniente de las regiones laterales de los hoyos y/o de los cascos coronales.

- Campo Magnético Solar que es arrastrado con el plasma solar.

De todas estas emisiones solares la irradiancia o radiación solar ha sido la más estudiada a lo largo del tiempo, ya que es la fuente evidente de vida en nuestro planeta y modula el clima directamente.

La radiación solar que llega a la Tierra cambia debido a tres mecanismos: variaciones de los parámetros orbitales del planeta (inclinación y excentricidad de su órbita, inclinación del eje de rotación), cambios en el albedo (debido por ejemplo a variaciones de la cubierta nubosa, de la composición atmosférica, de la distribución en masas terrestres y acuosas, de la cubierta de hielo) y variaciones intrínsecas de la irradiancia solar. Algunos de estos cambios son evidentes en escalas de tiempo de miles o aun millones de años, pero algunos otros ocurren en escalas de tiempo de minutos a décadas, tiempos observables por los seres humanos.

La observación del llamado calentamiento global de la Tierra que se inició desde el principio del siglo 20 y la insistencia en que éste se debe exclusivamente a la actividad antropogénica, ha llevado naturalmente a cuestionar si en este aumento de temperatura el Sol está jugando algún papel.

#### 4.1 Irradiancia y su interacción atmosférica

La irradiancia solar total (IST) se define como el flujo de energía solar en todo el rango de longitudes de onda que llega a la parte superior de la atmósfera terrestre a la distancia de 1 UA.

La IST se empezó a medir directamente por primera vez por el francés Claude Pouillet en París en 1837. A principios del siglo 20 se midió en observatorios de montaña, en la década de 1920 a bordo de aviones y globos y en la década de 1960 a bordo de las misiones espaciales. Actualmente se cuenta con aparatos a bordo de satélites que han alcanzado gran precisión en las mediciones.

En la Figura 15(a) (Fröhlich *et al.*, 1997) observamos la existencia de varias series de IST obtenidas de la observación satelital. Estas series se pueden

combinar para construir una sola, llamada serie de tiempo compuesta de la IST. Willson (1997) y Willson y Mordvinov (2003) construyeron una serie usando los resultados del Nimbus 7/ERB junto con los del ACRIM I y ACRIM II, mientras que Fröhlich y Lean (1998) y Fröhlich (2000) usaron los resultados de los ERBS junto con los del ACRIM I y el ACRIM I.

En su reconstrucción Fröhlich y Lean (1998) encontraron un ciclo prominente de 11 años que presenta una diferencia de  $\sim 0.085\%$  entre septiembre 1986 (correspondiente al mínimo de actividad de ese ciclo solar) y noviembre 1989 (correspondiente al máximo de actividad de ese ciclo). La Figura 15(b) muestra la serie compuesta de Fröhlich (2000).

##### 4.1.1 Irradiancia solar en la órbita terrestre

La irradiancia solar en la órbita de nuestro planeta puede calcularse como sigue:

De la Ley de Stefan-Boltzman

$$U = \sigma T^4 \quad (1)$$

donde

U = emitividad = energía por unidad de área y tiempo  
 $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$   
 T = temperatura.

La energía que atraviesa una esfera de radio R será:

$$E = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (2)$$

para el Sol:

$$R = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$$

$$T = \text{temperatura de la Fotosfera} = 5785 \text{ K}$$

Usando (1), la energía que llega a la órbita de la Tierra será:

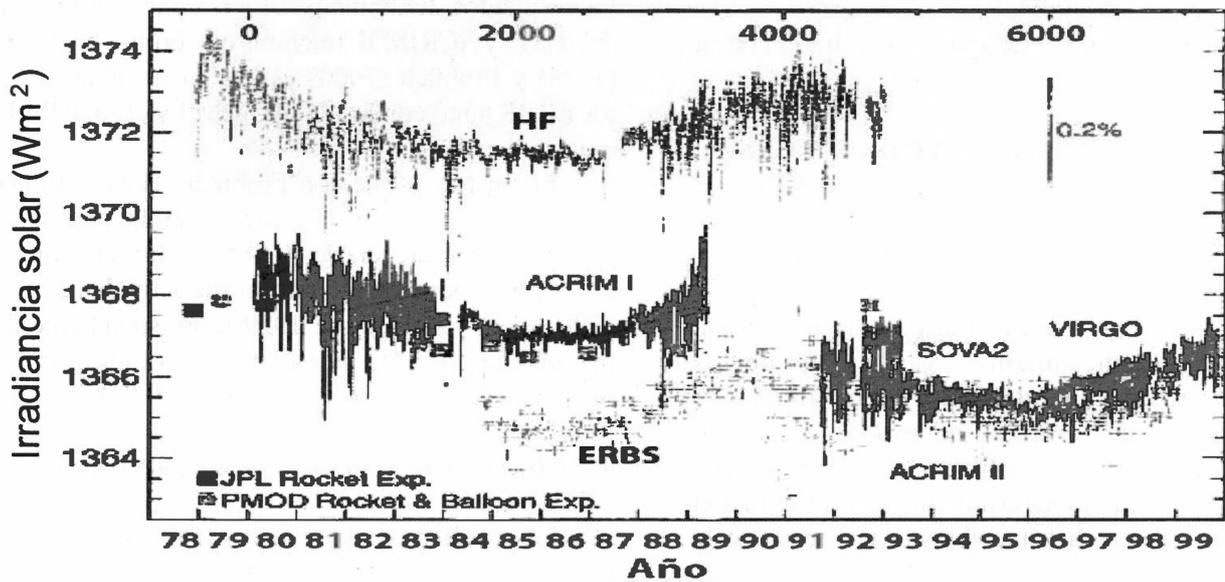
$$E = u4\pi R_{S \rightarrow T}^2, \quad (3)$$

donde u = energía por unidad de área y tiempo a 1UA;  
 $R_{S \rightarrow T} = 1 \text{ UA}$ .

Por conservación de energía tenemos que la energía que abandona al Sol se preserva a la altura de la órbita terrestre. Entonces, igualando (2) con (3) tenemos:

$$u4\pi R_{S \rightarrow T}^2 = 4\pi R^2 \sigma T^4. \quad (4)$$

(a)



(b)

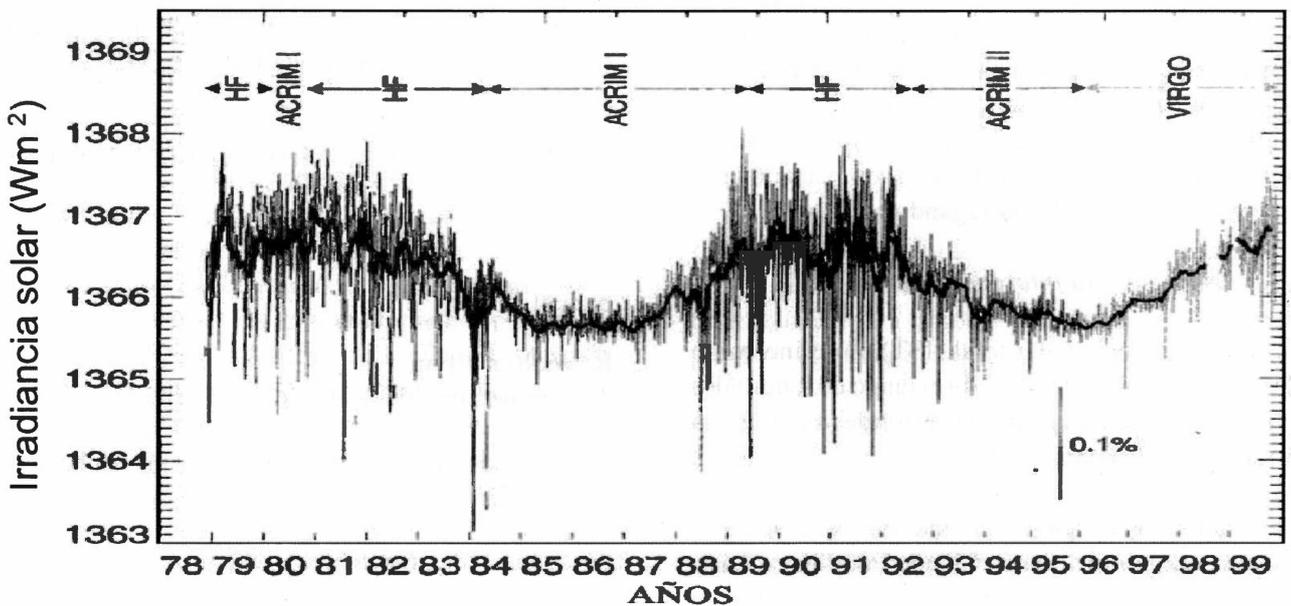


Fig. 15. (a) Promedios diarios de la irradiancia solar medidos desde 1978. Los instrumentos son los siguientes: el radiómetro HF en el satélite NIMBUS 7, el radiómetro Active Cavity Radiometer (ACRIM I) en el satélite Solar Maximum Mission (SMM), el experimento Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) en el satélite Earth Radiation Budget Satellite (ERBS), el radiómetro ACRIM II en el satélite Upper Atmosphere Research Satellite (UARS), el experimento Solar Variability (SOVA2) en el satélite European Retrievable Carrier (EURECA) y el experimento Variability of Irradiance and Gravity Oscillation (VIRGO) en el satélite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). También se muestran las mediciones llevadas a cabo en cohetes y globos (JPL Rocket Exp. Y PMOD Rocket & Balloon Exp.). (b) Irradiancia compuesta construida por Fröhlich (2000) usando los resultados del HF, los ERBS y los del ACRIM I y el ACRIM II.

Por tanto

$$u = \left[ \frac{R}{R_{S \rightarrow T}} \right]^2 \sigma T^4 \quad (5)$$

Sustituyendo valores:

$$u = 1367.2 \text{ W/m}^2 \quad (6)$$

$u$  se ha llamado históricamente constante solar, pero hoy se le conoce simplemente como irradiancia solar. Cabe hacer notar que las observaciones satelitales indican una irradiancia promedio de  $1367 \pm 4 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.1.2 Interacción con la atmósfera terrestre

En la Figura 16 mostramos el espectro de la irradiancia solar incidente en el tope de la atmósfera. El espectro es muy similar al de un cuerpo negro a 5770 K, particularmente en las longitudes de onda del visible y mayores. Tiene un máximo cerca de los 500 nm y decrece casi seis órdenes de magnitud en los rayos X (que no se ven en la figura) y en las regiones de radio. Alrededor del 50% de la irradiancia solar se emite en el visible y cercano infrarrojo entre los 400-800 nm, mientras que entre los 300 y 10 000 nm está el 99% (Fligge *et al.*, 2001). Estas regiones del espectro son radiadas principalmente por la Fotosfera solar en donde se encuentran las manchas solares y las fáculas. El espectro en longitudes de onda mayores y menores que las mencionadas se

origina principalmente en los niveles superiores de la atmósfera solar.

Al ingresar en la atmósfera terrestre, la irradiancia solar sufre absorciones dependiendo de la capa atmosférica en la que incide. En la Tabla 2 notamos que todas las longitudes de onda menores de 300 nm son absorbidas de la Estratosfera hacia arriba, mientras que la radiación en el visible y en el cercano ultravioleta (UV) llega hasta la Troposfera. También en la Figura 16 el espectro incidente en el tope de la atmósfera se compara con el recibido en la superficie terrestre (marcado con 0 km). Se observa que hay una considerable absorción en el ultravioleta y cercano infrarrojo debido al  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$  y  $CO_2$  atmosféricos respectivamente.

En la misma Figura 16 observamos que las variaciones de la radiación dependen de su longitud de onda. Para longitudes de onda cortas la variación es grande comparada con longitudes más largas, para el UV los cambios son de 20% cerca de los 140 nm, 8% cerca de los 200 nm y 3% cerca de los 250 nm (Lean *et al.*, 1997; Rottman, 2000). De acuerdo con la figura la mayor parte de la variación espectral ocurre por debajo de los 500 nm.

La variación de la irradiancia espectral en el visible e infrarrojo no se conoce del todo debido a la ausencia de mediciones de largo plazo. Las variaciones que aparecen en la Figura 16 para

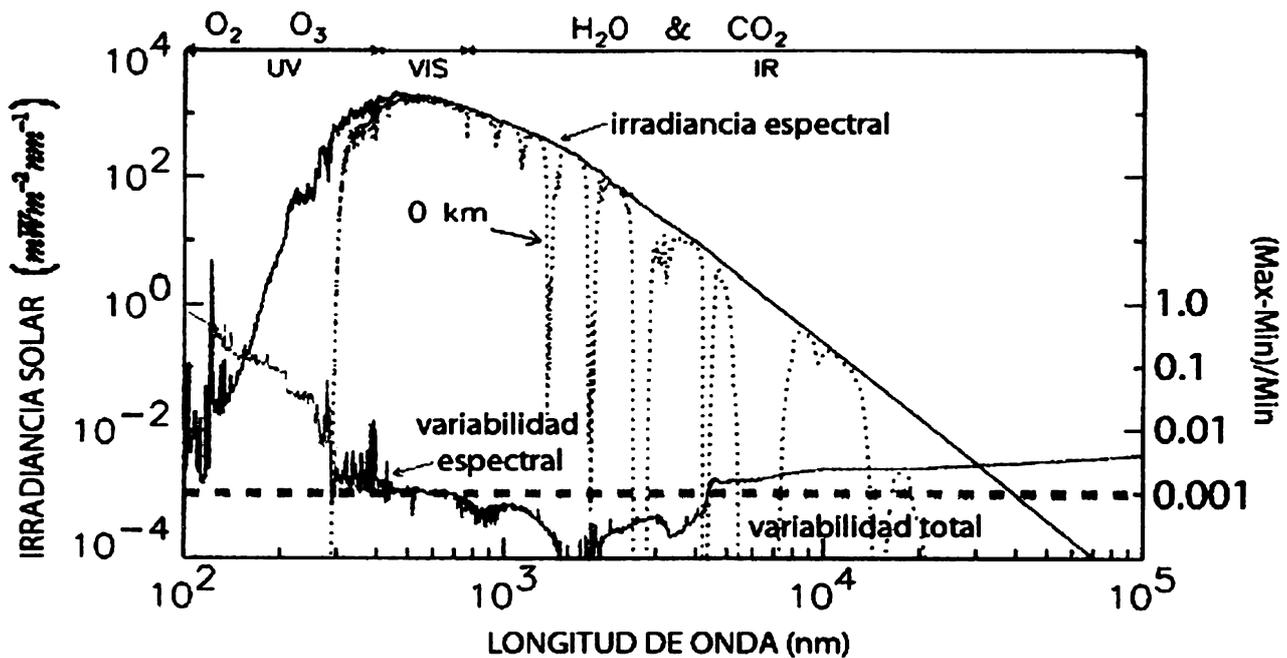


Fig. 16. Espectro de la irradiancia solar en el tope de la atmósfera. También se observan las variaciones de la misma.

longitudes de onda mayores de 400 nm provienen de estimaciones teóricas (Solanki and Unruh, 1998). Sin embargo, en una revisión de observaciones Fligge *et al.* (2001) indican que puede haber una variabilidad de ~ 0.1% a lo largo del ciclo solar.

#### 4.1.3 Origen de las variaciones de la irradiancia solar

Por casi un siglo se intentó medir la variación de la irradiancia solar de manera infructuosa, es por ello que se le llamó históricamente la “constante solar”. Esta incapacidad se debió en parte a que la precisión de los instrumentos no era la suficiente como para detectar los pequeños cambios asociados a la variabilidad de la irradiancia y también al desconocimiento de la absorción selectiva de nuestra atmósfera.

Cuando se alcanzó la precisión suficiente y las mediciones se llevaron a cabo fuera de la atmósfera, se observaron las variaciones presentadas en la Figura 16. La escala vertical izquierda nos indica la diferencia de irradiancias entre el máximo y el mínimo para un ciclo solar por rangos de longitudes de onda. Como ya se mencionó, las variaciones más grandes están en longitudes de onda del UV y

menores donde el cambio llega a ser hasta de un 100%, mientras que en el visible es del 0.1%, en el cercano infrarrojo despreciable y en el lejano infrarrojo y radio llega al 1% aproximadamente. La línea punteada horizontal indica la variación de la irradiancia total con un valor de 0.1%.

Se han identificado como principales fuentes solares de la variabilidad de la irradiancia solar total las siguientes:

- 1) Variaciones de minutos a horas debido a la granulación y la meso y supergranulación.
- 2) Variaciones de 5 minutos asociadas a oscilaciones del interior solar.
- 3) Variaciones de pocos días a semanas del orden de 0.3% . Las manchas solares son la principal causa.
- 4) A lo largo del ciclo de actividad solar se observa un aumento entre el mínimo y el máximo de ~0.1%. Se atribuye principalmente a las fáculas y los elementos magnéticos de la cromosfera. Las fáculas pueden incrementar la irradiancia hasta 0.08%
- 5) Variaciones a más largo plazo no se han detectado debido al corto intervalo de las observaciones.

**Tabla 2**

Interacción de la irradiancia solar con la atmósfera terrestre

$\lambda$ (nm)	Nombre de la radiación	Efecto	Altura (km)	Capa atm.
Hasta 10	Rayos $\gamma$ Rayos x	Ioniza todos los gases	70-100	Mesosfera Termosfera
10-100	XUV	Ioniza N <sub>2</sub> , O, O <sub>2</sub>	100-300	Termosfera
100-120	EUV	Ioniza O <sub>2</sub>	80-100	Termosfera
120-200	VUV	Disocia O <sub>2</sub>	40-130	Estratosfera Mesosfera y Termosfera
175-200	VUV y UV	Disocia O <sub>2</sub> Forma O <sub>3</sub>	30	Estratosfera
200-240	UV	Disocia O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	20-40	Estratosfera
240-300	UV	Disocia O <sub>3</sub>	<40	Estratosfera

*Inm = 1 x 10<sup>-9</sup> m, XUV= Rayos X- ultravioleta, EUV= extremo ultravioleta, VUV= ultravioleta vacío, UV= ultravioleta*

#### 4.1.4 La temperatura de la Tierra

La cantidad de radiación que ingresa a la atmósfera terrestre proveniente del Sol se distribuye de la siguiente manera:

$$E_i = E_r + E_a \quad (7)$$

donde

$E_i$  = radiación incidente en la Tierra  
 $E_r$  = radiación reflejada por la Tierra  
 $E_a$  = radiación absorbida por la Tierra.

Un parámetro importantísimo para calcular la cantidad de radiación que se absorbe es el *albedo* A:

$$A = \frac{E_r}{E_i} \quad (8)$$

Por tanto de (8)

$$E_r = AE_i \quad (9)$$

La cantidad de radiación absorbida por la Tierra es, usando (7) y (9):

$$E_a = E_i (1-A) \quad (10)$$

Hay que notar que la energía incidente es interceptada por la Tierra en una superficie aproximadamente circular, y entonces la radiación solar promedio en el tope de la atmósfera es:

$$E_i = \pi R_T^2 u \quad (11)$$

donde  $R_T$  = radio terrestre, y  $u$  está dada por (5).

Entonces a partir de (10) la radiación absorbida por la Tierra es:

$$E_a = \pi R_T^2 u (1 - A) \quad (12)$$

Por otro lado la radiación que emite la Tierra, suponiéndola esférica, es:

$$4\pi R_T^2 \sigma T_T^4 \quad (13)$$

Igualando la cantidad absorbida, (12), con la emitida, (13), tendremos:

$$\pi R_T^2 u (1 - A) = 4\pi R_T^2 \sigma T_T^4 \quad (14)$$

De (14) obtenemos la temperatura de la Tierra:

$$T_T = \left| \frac{u(1-A)}{4\pi} \right|^{1/4} \quad (15)$$

Para la Tierra  $A \sim 0.3$ , y  $u = 1367.2 \text{ W/m}^2$  entonces:  $T \sim 255 \text{ }^\circ\text{K} \sim -18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Pero la temperatura promedio de la Tierra es actualmente  $T \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$  ¡faltan  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ ! El faltante lo proporciona el efecto invernadero de los gases atmosféricos, principalmente el vapor de agua y el  $\text{CO}_2$ . Sin ellos la Tierra en efecto sería muy fría.

Como mencionamos, la irradiancia solar tiene un valor aproximado de  $1370 \text{ W m}^{-2}$  y la fracción interceptada por la Tierra es de alrededor de un cuarto de este valor,  $343 \text{ W m}^{-2}$ .

Considerando además que el albedo global del planeta es 0.3, la Tierra absorbe una cantidad de radiación de unos  $240 \text{ W m}^{-2}$ , que debe re-emitir para mantener la temperatura del planeta constante.

#### 4.2 Modelos empíricos de las variaciones de la IST

De los diversos procesos que se han propuesto para explicar las causas de la variación de la IST (por ejemplo, cambios fotosféricos de la temperatura Khun y Libbrecht, 1991; cambios en el diámetro solar, Sofia y Fox, 1994; cambios en la convección, Hoyt y Schatten, 1993) el cambio en la cantidad y distribución del flujo magnético sobre la superficie solar es el que más se ha desarrollado (Foukal y Lean, 1988; Lean *et al.*, 1998).

La mayoría de las reconstrucciones recientes de la IST suponen que todas sus variaciones se deben a cambios del campo magnético superficial. El campo sobre la superficie solar se organiza en tubos de flujo de diferentes tamaños, los mayores son los de las manchas solares y los más pequeños corresponden a las fáculas y los elementos magnéticos de la cromosfera. La evolución temporal de estas estructuras indica la variación de la actividad magnética solar y por tanto también indicaría las variaciones en brillo y constituyen los llamados índices de actividad solar. Los más conocidos son por ejemplo, el número de manchas solares, el área de las playas, el flujo en radio de 10.7 cm, el índice cromosférico global derivado de la emisión en las líneas de Mg, He o Ca.

También hay índices indirectos de la actividad solar tales como los isótopos cosmogénicos  $\text{Be}^{10}$  y  $\text{C}^{14}$ , que como ya vimos, son producidos por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera

terrestre y depositados en el suelo; el flujo de rayos cósmicos es a su vez modulado por la actividad solar. En la Figura 17 vemos las series temporales de estos índices.

Los índices de actividad solar se utilizan para construir índices de irradiancia tales como el de brillantamiento facular (e.g. de Toma, 1997) o el oscurecimiento de manchas solares (Lean *et al.*,

1998). Según el índice de irradiancia solar que se use, hay diferentes modelos que se han desarrollado incluso para tiempos anteriores a las observaciones de la IST. Estos modelos son fenomenológicos en contraste con los modelos físicos que se basan en la teoría radiativa.

Los modelos de corto plazo, que comprenden tiempos del orden del ciclo solar, usan como

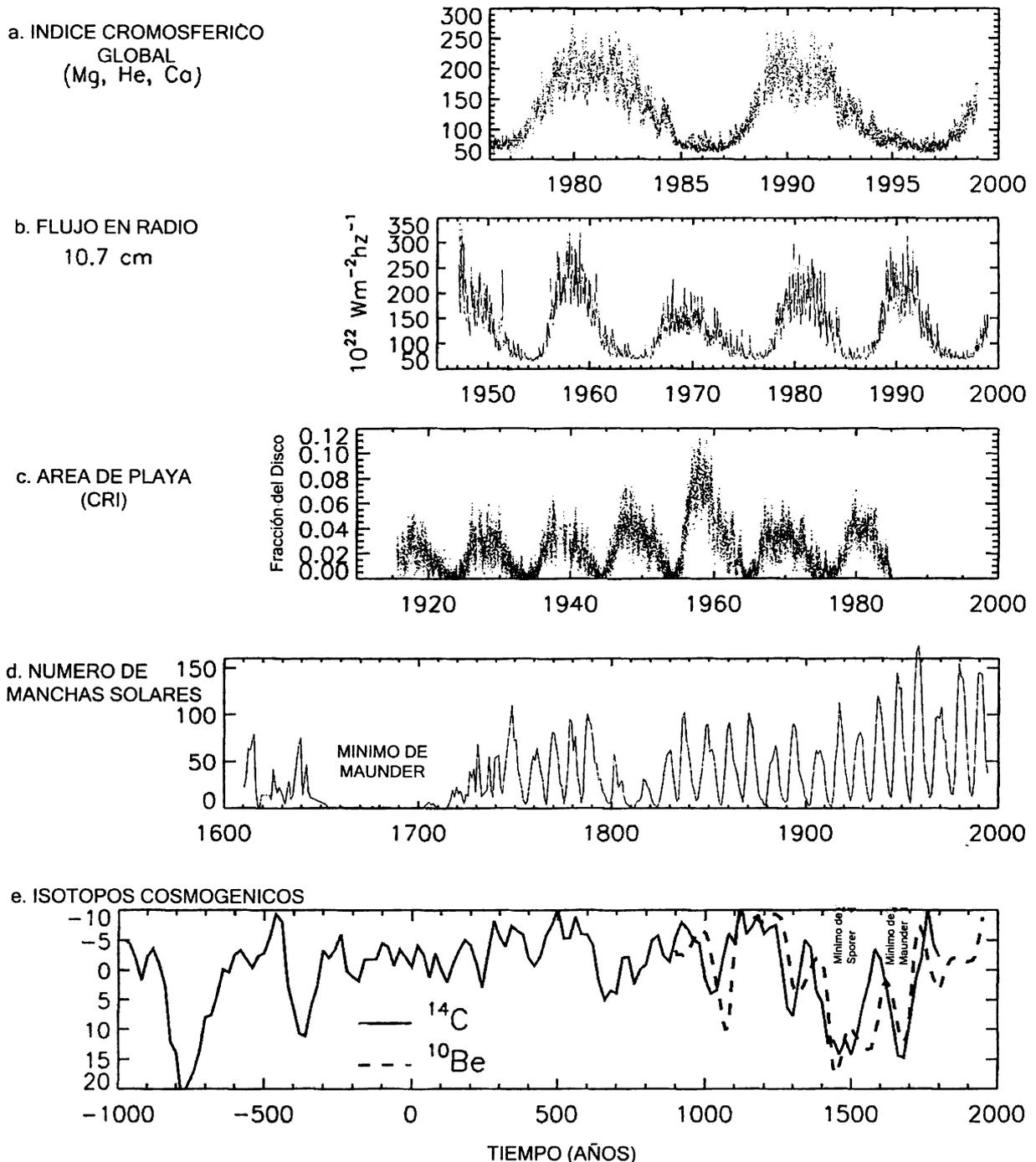


Fig. 17. Índices directos e indirectos de la actividad solar.

condiciones de frontera el abrillantamiento facular y el oscurecimiento de las manchas solares (por ejemplo los desarrollados por Fröhlich y Lean, 1998; Solanki y Fligge, 1998). Estos modelos pueden reproducir ~ 80% de la variabilidad de la IST observada (Solanki y Fligge, 2002; Fröhlich, 2002). En la Figura 18 se observa uno de estos modelos (Fröhlich y Lean, 1998).

Los cambios a largo plazo de la IST son especulativos. Este tipo de reconstrucciones usan además del abrillantamiento facular y el oscurecimiento de las manchas solares a lo largo del ciclo solar, el oscurecimiento secular producido por la variación de los grupos de manchas solares, o bien el efecto de la variación en la longitud del ciclo (tomada como el tiempo que hay entre dos mínimos solares y mismo que varía de ciclo a ciclo) (Lean *et al.*, 1995; Solanki y Fligge, 1999). La Figura 19 muestra un modelo a largo plazo desarrollado por Lean *et al.* (1995); en este modelo se usó como componente a largo plazo la contribución de los grupos de manchas solares. Los resultados de este modelo indican que durante el mínimo de Maunder (1645-1710) hubo un cambio de 0.24% en la IST. Hay otra variación notable de la misma alrededor del año 1800, conocido como el mínimo de Dalton (1795-1823), y a partir de 1900 la irradiancia se ha incrementado.

## 5. ALGUNOS FENÓMENOS CLIMÁTICOS Y SU POSIBLE RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD SOLAR

Ya se mencionó que los cambios en la IST producen cambios en la energía que ingresa en la atmósfera terrestre, donde se dan los fenómenos del clima y donde existe la biosfera.

A lo largo del tiempo, los parámetros climatológicos se han tratado de asociar con ciclos de periodo largo y corto de la actividad solar. La búsqueda de esta asociación empezó aún antes de que Schwabe descubriera el ciclo de manchas solares en 1843. Por ejemplo, el famoso astrónomo inglés Herschel, sugirió en 1801 que el precio del trigo en Londres estaba indirectamente controlado por el número de manchas solares; esto basado en sus observaciones de que cuando el número de manchas solares era pequeño menos lluvia caía en Londres. En la mayoría de los casos, la significación estadística de resultados históricos como el citado no puede ser evaluada hoy en día, su valor por lo tanto, es muy discutible.

Se han propuesto muchas correlaciones entre las variaciones climáticas y los fenómenos solares, pero estas correlaciones no han persistido a lo largo del tiempo. Por tanto este tópico permanece controversial

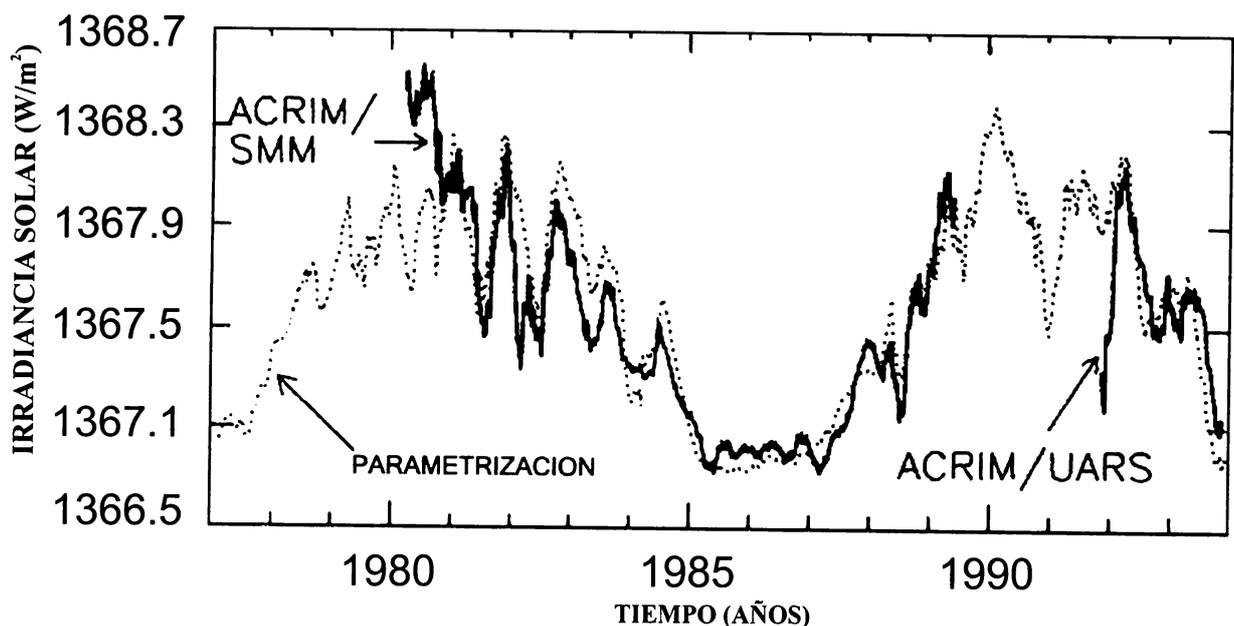


Fig. 18. Modelo de corto plazo de la IST utilizando el oscurecimiento de las manchas solares y el abrillantamiento de las fáculas.

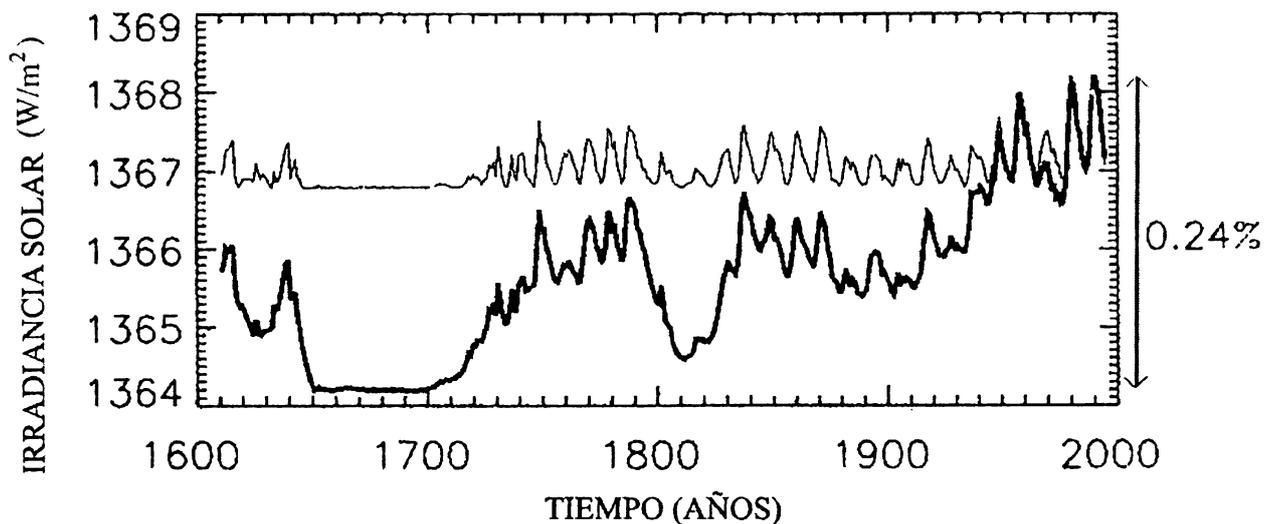


Fig. 19. Modelo a largo plazo de la IST utilizando el oscurecimiento de las manchas solares y el abrillantamiento de las fáculas y además una componente proporcionada por la variación secular de los grupos de manchas solares.

(ver por ejemplo la revisión de Hoyt and Schatten, 1997).

Se ha observado, de acuerdo con la Figura 20, un calentamiento global promedio de  $0.6^\circ \pm 0.2^\circ\text{C}$  desde principios del siglo 20 (IPCC TAR, 2001). Este aumento ha sido atribuido predominantemente, si no es que exclusivamente, a la influencia antropogénica sobre el clima. El interés actual del papel que juega el Sol en el cambio climático proviene de la posibilidad de que nuestra estrella también contribuya al incremento observado de la temperatura.

Como ya mencionamos, sólo  $239 \text{ W/m}^2$  de la radiación solar incidente se distribuye en nuestro planeta. En su viaje a través de la atmósfera, la irradiancia solar con longitudes de onda menores de  $300 \text{ nm}$  es absorbida en la estratosfera y más arriba. También como ya vimos es para longitudes de onda cortas que tenemos las variaciones mayores. Para los últimos dos ciclos solares la proporción de la IST que llega a la troposfera varía a lo largo del ciclo solar en  $\sim 0.1\%$ ; esta variación es del mismo orden de magnitud que las incertidumbres de los modelos climáticos y por tanto demasiado pequeña para tener efecto en los cálculos de estos modelos.

La variación observada de la IST del  $0.1\%$  en los últimos 20 años corresponde a cambios de  $\sim 0.24 \text{ W/m}^2$  en la baja atmósfera. Los modelos de variación secular de la IST indican cambios de  $0.24\%$  a  $0.30\%$  (Lean *et al.*, 1995; Lean *et al.*, 1997) correspondiendo a  $0.5$  to  $0.75 \text{ W/m}^2$ , con valores extremos en la fase

más profunda del mínimo de Maunder de hasta  $2.9 \text{ W/m}^2$  (Mendoza, 1997). Esto indica que la variabilidad solar ha sido pequeña para la mayoría de estos periodos comparada con las estimaciones del efecto antropogénico de los gases de invernadero que es de  $2.4 \text{ W/m}^2$  durante el siglo 20 (Houghton *et al.*, 1996).

Los dos parámetros más comunes usados para definir el clima han sido la precipitación y la temperatura, y éstos han sido utilizados en una gran cantidad de estudios sobre la asociación Sol-clima. Indicadores indirectos de la precipitación, tales como los niveles del agua en ciertos lagos, también han sido correlacionados con el número de manchas solares, aunque estas variables son de mayor interés para los hidrólogos que para los climatólogos.

La presión atmosférica en la superficie, para zonas diversas, ha sido también un parámetro popular para correlacionar con el número de manchas solares, habiéndose investigado los sistemas de presiones y vientos, así como las trayectorias de las tormentas.

Ahora bien, si existe alguna relación de la actividad solar con los parámetros atmosféricos, ésta debe ser distinguible en todos y cada uno de ellos, ya que se hallan íntimamente relacionados en el sistema atmosférico.

La mayor parte de las correlaciones se han hecho con la temperatura. A continuación presentamos algunos ejemplos de estas correlaciones.

### 5.1 Correlaciones de la temperatura con el ciclo solar.

Los intentos de correlacionar la temperatura del aire en la superficie de la Tierra con el ciclo de manchas solares ha producido en el pasado resultados contradictorios, pues en estudios realizados a finales del siglo 19 y principios del 20 la correlación con el ciclo de 11 años fue positiva (máxima temperatura promedio durante el máximo de manchas solares) o negativa, dependiendo de la región geográfica y la extensión en tiempo de los datos (ver revisión de Hoyt y Schatten, 1997).

Actualmente contamos con series más largas de datos que abarcan alrededor de un par de siglos, y se encuentra que las temperaturas globales parecen estar correlacionadas a largo plazo positivamente con la actividad solar: periodos largos de frío coinciden con los de mínima actividad solar y viceversa. Por ejemplo, en México, usando temperaturas tanto históricas a partir de 1500 como del periodo instrumental a fines del siglo 19, se encontraron periodicidades en este parámetro asociadas a la actividad solar (Mendoza *et al.*, 2001).

Observando la Figura 20 que representa la temperatura promedio del hemisferio norte, notamos que entre 1940 y 1970 hay un decremento de la

temperatura, siendo que la emisión de CO<sub>2</sub> a partir de 1900 ha ido siempre en ascenso. Este decremento se ha tratado de explicar por el aumento en aerosoles antropogénicos que contribuyen a disminuir la temperatura. A partir de 1970 la temperatura ha vuelto a incrementarse. Por otro lado la misma figura nos muestra que la variación en la actividad solar ha seguido cercanamente a las variaciones de la temperatura, este comportamiento ha motivado que se continúen los estudios del impacto de la actividad solar en el clima.

### 5.2. Impacto de la IST en el clima

Se ha intentado estimar el impacto de la IST en el clima obteniendo correlaciones lineales entre los registros de temperatura y las reconstrucciones de la IST. Por ejemplo, Lean *et al.* (1995) usan una reconstrucción de la IST desde 1610 al presente. Dividen la variación de la IST en dos componentes: una que depende del ciclo de 11 años y otra que varía secularmente debido a la amplitud del grupo de manchas solares. Para la temperatura usan los promedios decenales del hemisferio norte reportados en el IPCC92. Los resultados se ven en la Figura 21; los autores concluyen que de 1610 a 1800 hay una alta correlación entre ambas series de datos ( $r=0.86$ ). De 1860 al presente sólo la mitad del calentamiento observado es directamente atribuible a la variación

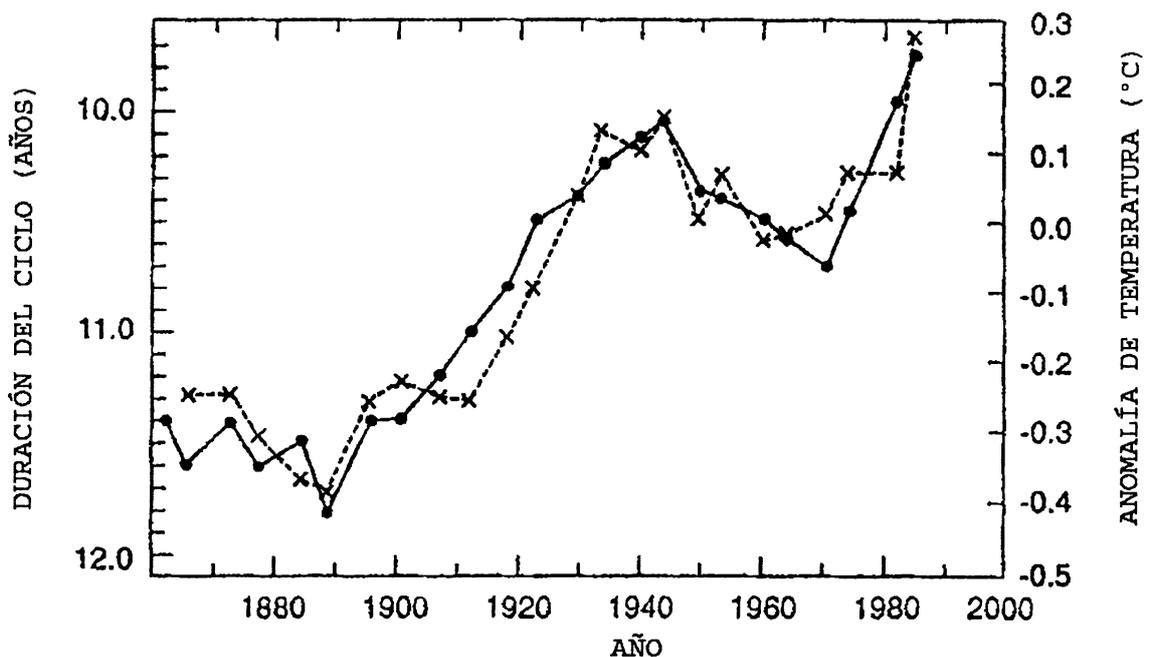


Fig. 20. Temperatura promedio del hemisferio norte (línea punteada) y actividad solar (línea continua).

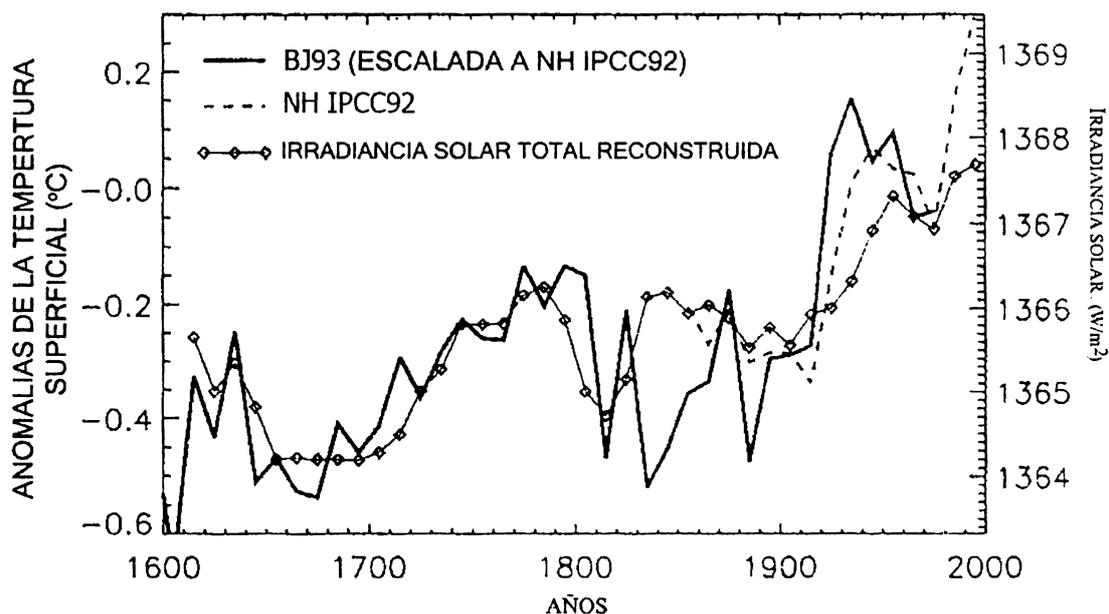


Fig. 21. Comparación entre la temperatura promedio del hemisferio norte (NH) y una reconstrucción de la IST.

de la IST, pero 65% de este calentamiento ha ocurrido a partir de 1970 cuando el forzamiento solar ha contribuido con sólo un tercio. Más recientemente Solanki y Krivova (2003) usaron la IST para el lapso de 1856 a 1999 usando dos diferentes composiciones de la IST, la de Willson (1997) y la de Fröhlich y Lean (1998); la componente a largo plazo de la IST que usaron fue la longitud y la amplitud del ciclo de manchas solares. También usaron las temperaturas superficiales promedio globales y del hemisferio norte. Los promedios suavizados a 11 años presentan para los años anteriores a 1970 una buena correlación de  $r = 0.83$  y  $r = 0.97$  con las temperaturas globales y hemisféricas respectivamente. Los autores indican que después de 1970 la contribución de la IST es a lo más del 30% coincidiendo con Lean *et al.* (1995).

### 5.2.1 Modelos de la influencia de la IST en el clima terrestre

Los resultados de modelos de balance de energía (e.g. Crowley, 2000) y otros más complejos como los tridimensionales acoplados de océano-atmósfera (e.g. Cubasch y Voss, 2000) indican que cambios relativamente pequeños de la IST pueden causar cambios de la temperatura superficial del orden de algunas décimas de grado. En particular Cubasch y Voss (2000) usaron una versión de un modelo de circulación general y dos diferentes reconstrucciones de la IST basadas en la longitud y amplitud del ciclo de manchas para el periodo de 1770 a 1992 (Lean *et*

*al.*, 1995; Hoyt y Schatten, 1993). El resultado no muestra en la temperatura el ciclo de 11 años característico de la actividad solar, pero que sí produce un calentamiento en los últimos 100 años. Estos autores comparan su simulación con diversas reconstrucciones de la temperatura del hemisferio norte como se aprecia en la Figura 22.

La simulación, como se puede ver, representa bien a la temperatura entre 1700 y 1790; sin embargo, después de 1790 y hasta 1890 la reconstrucción y la temperatura se comportan de manera opuesta. Durante los últimos 100 años la simulación presenta un incremento de entre 0.17K y 0.19K, mientras que las observaciones indican 0.6K; esto significa que la IST contribuye moderadamente al incremento de temperatura observado.

Otro modelo desarrollado por Shindell *et al.* (2001) examinó la respuesta climática a los cambios de la IST entre finales del siglo 17 y finales del 18. Usaron una versión de un modelo de circulación general que incluye una parametrización de la respuesta del estrato estratosférico de ozono a cambios de la IST. Estos autores trabajaron con la IST de Lean *et al.* (1995). Obtuvieron cambios globales de 0.3° a 0.4 °C, coincidiendo con las reconstrucciones de temperatura. También obtuvieron cambios regionales de temperatura del orden de 1° a 2°C en el invierno del hemisferio norte. Las simulaciones del siglo 20 muestran que la IST junto

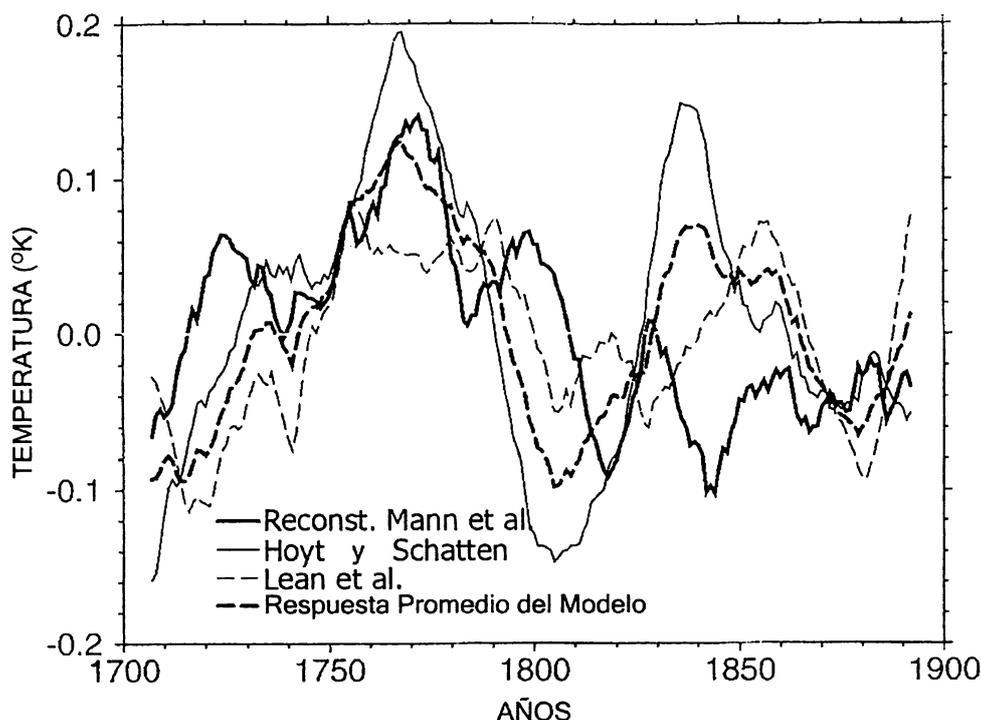


Fig. 22. Modelo tridimensional acoplado de océano-atmósfera tomando en cuenta dos modelos de la IST y comparado con la temperatura del hemisferio norte.

con las variaciones del ozono y otros factores tales como los aerosoles producen un cambio de temperatura de  $\sim 0.19^{\circ}\text{C}$ , que es casi un tercio del calentamiento observado.

### 5.3 Otros fenómenos solares que pueden modular el clima

#### 5.3.1 Radiación ultravioleta

La conclusión que se obtiene de los estudios mencionados arriba es que antes de 1970 los cambios de la IST reproducen relativamente bien la temperatura observada, pero es claro que la IST no es la causa de todos los cambios de temperatura, aun más, después de 1970 la influencia de la IST ha disminuido notablemente. Entonces debe haber otras fuentes que provocan los cambios de temperatura, ya sea otros fenómenos solares o diferentes de los solares.

Además de la IST, otros dos mecanismos asociados a la actividad solar se han propuesto para explicar la relación Sol-clima: variaciones en la radiación UV y el viento solar y las partículas energéticas.

La radiación solar en UV se ha usado como un modulador del clima, porque esta radiación es

absorbida por el ozono estratosférico elevando en esa región la temperatura. El calentamiento de la baja estratosfera produce fuertes vientos que penetran en la troposfera, lo cual altera la circulación de la celda de Hadley, sistema convectivo que existe en la troposfera y que transporta calor del ecuador a los polos; la modificación de este transporte altera la temperatura de la baja atmósfera (Haigh, 1999; Shindell *et al.*, 1999). Los modelos muestran una variación de 11 años en la estratosfera, pero la amplitud de los cambios es muy pequeña comparada con las observaciones (Larkin *et al.*, 2000). Aun más, Foukal (2002) comparó su reconstrucción de la radiación UV con la temperatura global en el periodo 1915-1999, encontrando una correlación muy pobre de  $r = 0.46$ . Este resultado sugiere que la interacción del UV y el clima es más bien indirecta.

El viento solar modula el flujo de rayos cósmicos, la precipitación de electrones relativistas y la distribución del potencial ionosférico en las capas polares; cada uno de estos efectos influye en la densidad de corriente ionosfera-Tierra. Las variaciones de esta corriente cambian la carga de las partículas de aerosol. Los aerosoles cargados son más efectivos que los neutros como nucleadores de hielo, entonces el aumento de núcleos cargados aumenta la producción de hielo por contacto y por

tanto la microfísica de nubes y el clima (Tinsley, 2000).

Después de encontrar una buena correlación entre cambios de la cubierta nubosa y el flujo de rayos cósmicos en el periodo 1983-1994, Svensmark y Friis-Christensen (1997) sugirieron que el flujo de rayos cósmicos modula la producción de nubes en escalas de tiempo de décadas y tal vez mayores. Trabajos posteriores parecieron confirmar esta hipótesis, pero para nubes bajas específicamente (menores de 3.5 km de altura) (Marsh and Svensmark, 2000; Pallé and Butler, 2000); sin embargo, también hay serios cuestionamientos a esta hipótesis que tienen que ver con el manejo de los datos nubosos que permitieron encontrar la correlación (Laut, 2003). Ramírez *et al.* (2004) y Ramírez *et al.* (2006) trabajando con el modelo termodinámico del clima para los años 1984-1990, mostraron que se pueden obtener cambios de algunas décimas de grado en la temperatura promedio del hemisferio norte, forzando este modelo con una cubierta de nubes tanto total como baja modulada por el flujo de rayos cósmicos. Aun más, Pudovkin y Veretenenko (1995) mostraron que los decrementos de rayos cósmicos conocidos como decrementos Forbush producen variaciones de corto plazo en la cantidad de nubes de alta altitud para la banda de latitud de 60 a 64°.

Por todo lo anteriormente discutido, consideramos que aunque el efecto antropogénico está indudablemente presente, el efecto de la actividad solar también debe tomarse en cuenta cuando se aborda el problema del calentamiento global.

### 5.3.2 Algunos modelos que incluyen forzamientos antropogénicos y naturales no asociados a la actividad solar

Modelos que incluyen el efecto de los gases de invernadero, pero sin la influencia solar, indican una tendencia lineal de aumento de la temperatura de 0.43 K para el siglo 20. Si se incluyen los gases de invernadero y los cambios en la IST el trabajo de Hoyt y Schatten (1993) da como resultado un aumento de 0.6K, el cual es muy cercano a las observaciones (Paeth *et al.*, 1999). Pero el modelo no contiene a los aerosoles, resultado también de la actividad antropogénica, quienes contribuirían a un enfriamiento de la atmósfera, lo cual disminuiría el calentamiento y entonces los resultados ya no concordarían con las observaciones.

Otro ejemplo son los estudios llevados a cabo por Crowley (2000) para el último milenio, quien fuerza un modelo con la IST de Lean *et al.* (1995), e incluye índices de vulcanismo y cambios en los gases de invernadero. Las explosiones volcánicas emiten volátiles ricos en azufre, que a su vez producen aerosoles ricos en azufre en la estratosfera, tales aerosoles reducen la entrada de la IST a la superficie (Toon y Pollack, 1980; Bradley y Jones, 1992). De esta manera hay menos energía solar disponible para los procesos de precipitación, por lo cual las erupciones volcánicas afectan al régimen de lluvias. Este autor encontró que para el periodo de su estudio la combinación entre IST y vulcanismo antes de ~1850 reproduce entre el 41% y el 64% de las variaciones de la temperatura. El autor también indica que en los últimos años del siglo 20 ha habido un inusual aumento de temperatura si se consideran los últimos mil años. Finalmente, él calcula que a lo más el 25% del incremento de temperatura observado en el siglo 20 es debido a la variabilidad natural, el restante 75% se debe al aumento de gases de invernadero.

Obviamente el contar con series de temperatura confiables es crucial para este tipo de estudios. Las reconstrucciones de la temperatura que se han realizado para el último milenio se basan en diferentes datos, calibraciones y suposiciones y aunque existen similitudes entre las diferentes series también hay grandes diferencias (Briffa *et al.*, 2001). El uso de series confiables se vuelve particularmente importante si se pretende asegurar que el aumento en la temperatura del siglo 20 es el mayor observado en los últimos mil años, siendo que hay estudios sugiriendo que en este periodo se han dado aun mayores incrementos de temperatura (Soon y Baliunas, 2003).

### 5.4 Respuesta de la baja atmósfera a fenómenos solares de corta duración

En años recientes, diversos análisis han mostrado que algunos fenómenos solares de corta duración pueden disparar una respuesta atmosférica en la troposfera. Por ejemplo, se ha visto que la capa de los 500 mb de presión, a una altura promedio de 13 km cambia considerablemente en el hemisferio norte durante las primeras 24 horas después de una fulguración solar. Se observa un incremento en la altura de esa capa en la región del polo geomagnético y un descenso en su altura en una región muy amplia que coincide con la zona auroral. Otros resultados

han mostrado que el flujo de aire estratosférico hasta el nivel de los 3 km se incrementa en el segundo o tercer día después de una fulguración solar con emisión de rayos X. Como ya se mencionó anteriormente, Pudovkin y Veretenenko (1995) mostraron que los decrementos Forbush producen variaciones de corto plazo en la cantidad de nubes de alta altitud para la banda de latitud de 60 a 64°, esto a su vez modifica la dinámica del clima. Resultados como éstos muestran que la circulación de la baja atmósfera se modifica significativamente después de fenómenos transitorios solares.

### 5.5 El Niño

Anualmente, por diciembre o enero, hace su aparición en las costas ecuatorianas y peruanas una corriente marina cuya temperatura es ligeramente más alta, 1 ó 2°C, que la temperatura promedio del océano Pacífico de esa zona y dura unos 4 meses. Como esta corriente surge en la época navideña, los pescadores de la región la han llamado El Niño, en alusión al niño Jesús de la tradición católica. En ciertos años, el aumento de temperatura de esa corriente es mayor alcanzando 5 ó 6°C, pudiendo perdurar incluso más de 2 años; es a este fenómeno, anormalmente caliente y largo, al que para fines científicos se le denomina El Niño.

El Niño representa sólo el aspecto oceánico de un fenómeno más complejo que tiene también una manifestación meteorológica conocida con el nombre de Oscilación del Sur, que consiste en el cambio aproximadamente bianual de dirección de los vientos ecuatoriales. Cuando la perturbación oceánica aparece, lo hace acompañada de la meteorológica, sin que sea todavía posible determinar, con los datos disponibles, cuál precede a cuál. Esto ha dado pie a que algunos investigadores al referirse a este fenómeno le llamen ENOS (El Niño/Oscilación del Sur). Asimismo, se ha observado que este fenómeno no está restringido a la región del Pacífico ecuatorial, sino que es un fenómeno global.

Para darnos una idea de la importancia que tienen las travesuras de El Niño, es suficiente decir que produce la mayoría de las alteraciones climáticas que no son atribuidas a las estaciones, no sólo en las regiones ecuatoriales, sino hasta latitudes mayores a las de nuestro país. Su influencia se manifiesta especialmente en las variaciones del régimen subtropical de lluvias. Causa tremendas sequías en

regiones como África del Sur, Indonesia, Filipinas, Australia y partes de México, mientras que en Ecuador, Perú u otras partes de México hay copiosas lluvias. Además, como los ecosistemas se modifican considerablemente, hay grandes repercusiones de este fenómeno sobre la vida del planeta.

Se ha propuesto que El Niño tiene su origen en el propio océano Pacífico, en el Índico e incluso en el Atlántico o en el Ártico, no obstante, ninguna de las proposiciones hechas explica de manera satisfactoria el o los mecanismos que dan lugar a tal evento.

Otra posibilidad sería que esta clase de eventos fueran disparada por causas externas al sistema océano-atmósfera, y en este caso lo obvio sería pensar en nuestro Sol como el responsable.

Contar con registros de El Niño desde 1765, ha permitido estudiar la distribución de estos acontecimientos a lo largo de 22 ciclos solares. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que clasificar un evento determinado como el Niño en los siglos anteriores al 20 es difícil. Para elaborar la serie de Niños, los investigadores tuvieron que recurrir a recuentos anecdóticos, la relación de campañas militares, las descripciones hechas por los misioneros y exploradores y a los anuarios sobre la cosecha de granos.

Los resultados de algunas investigaciones (Mendoza *et al.*, 1991; Anderson, 1992) indican que El Niño tiende a ocurrir más frecuentemente cerca de mínimos seculares de actividad solar, tales como el de Maunder y menos en épocas de actividad solar baja (ver Figura 23). Si hay una relación entre aumento de actividad solar y aumento de temperatura terrestre, El Niño sería uno más de los resultados de las relaciones solar-terrestres.

## 6. EL SOL Y SUS EFECTOS SOBRE LA TECNOLOGÍA

En el pasado, los efectos del Sol pasaron desapercibidos para los seres humanos. Conforme la tecnología se desarrolló utilizando corrientes, conductores y ondas electromagnéticas, los efectos solares se volvieron evidentes. Los primeros sistemas telegráficos utilizados en el siglo 19 se perturbaban por corrientes que parecían generarse espontáneamente. No fue sino hasta la Segunda Guerra Mundial,

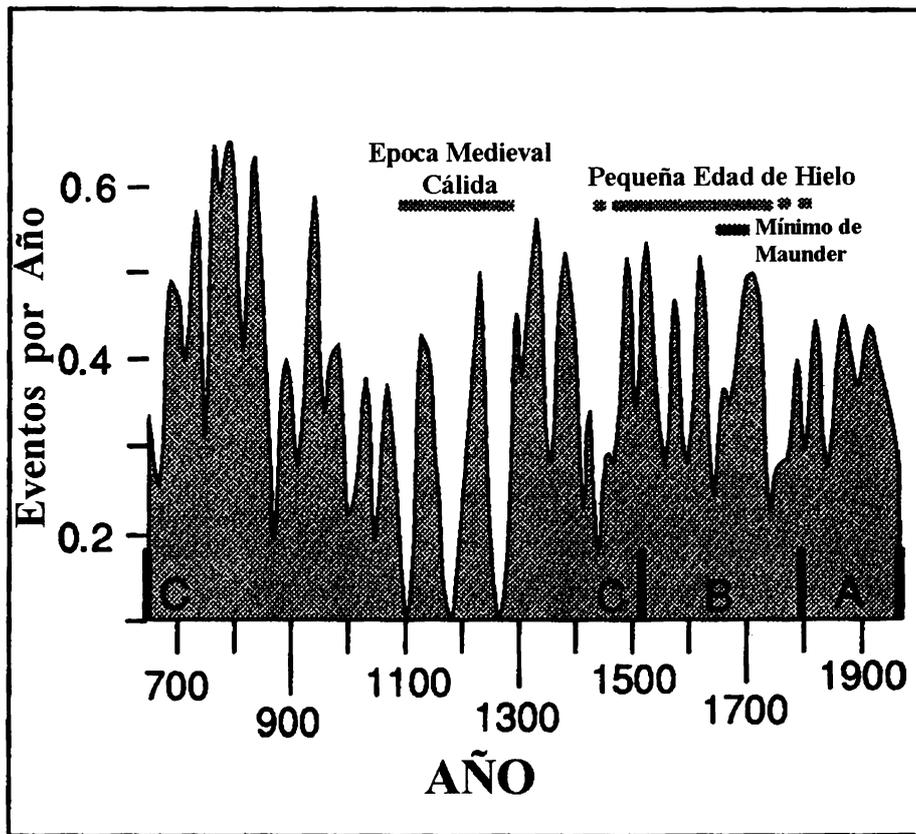


Fig. 23. Ocurrencia de El Niño.

cuando las radiocomunicaciones se empezaron a usar muy intensamente, que las perturbaciones solares se reconocieron como un problema serio. Desde entonces, nuestra dependencia de la tecnología electrónica ha crecido enormemente, y así mismo el potencial dañino del Sol. El colapso masivo del sistema hidroeléctrico de Québec en Canadá en 1989, el cual dio por resultado la pérdida temporal de 9450 megawatts de potencia eléctrica, marcó el momento en que no sólo la comunidad científica, sino el público en general se preocuparon por la actividad solar. Algunos de los efectos causados por el Sol que actualmente representan un problema son:

- Corrientes inducidas geomagnéticamente: El viento solar confina al campo geomagnético en una cavidad conocida como la magnetosfera. Ésta ocasionalmente se conecta con las líneas del campo magnético interplanetario permitiendo en ese caso una gran entrada de plasma y partículas solares al entorno terrestre que provocan cambios abruptos de la intensidad del campo magnético: las llamadas tormentas magnéticas. Durante una tormenta magnética las corrientes que fluyen en la región

ionizada de nuestra atmósfera, la Ionosfera, cambian rápidamente. Estas corrientes producen su propio campo magnético, el cual al combinarse con el terrestre genera cambios en el valor del campo original. Al nivel del piso este cambio induce corrientes eléctricas en cualquier conductor que esté presente. Estas corrientes se llaman corrientes geomagnéticamente inducidas, que frecuentemente fluyen por el suelo sin que lo notemos. Cuando hay un buen conductor, tal como los gasoductos u oleoductos o líneas de transmisión eléctrica, las corrientes viajan por sus paredes. Los voltajes generados son tales que producen diferencias de potencial; se han medido 10 volts en un kilómetro. Aunque esto no es mucho, en un oleoducto de mil kilómetros por ejemplo, se genera una enorme diferencia de potencial de 10 000 volts. Las corrientes eléctricas inducidas son más intensas a altas latitudes ya que los efectos solares son mayores que a bajas latitudes; la peligrosidad aumenta también en áreas que están sobre grandes depósitos de roca ígnea. Debido a que las rocas ígneas tienen una baja conductividad, las corrientes inducidas viajan a través de los conductores hechos por el

hombre. En los conductos eléctricos, las corrientes inducidas causan corrosión y mal funcionamiento de los medidores de flujo. Aunque las compañías eléctricas y petroleras se han ocupado de este problema y diseñan mecanismos de protección, al construir más y mayores sistemas de poder la vulnerabilidad se incrementa.

- Comunicaciones: Los satélites artificiales están colocados en órbitas que se encuentran fuera de la mayor porción de la atmósfera terrestre, de modo tal que hay poca fricción sobre ellos. Los satélites de comunicaciones se encuentran a casi 6 radios terrestres (un radio terrestre: 6378 km), pero hay satélites que orbitan más bajo. Durante épocas de alta actividad solar se incrementa de radiación ultravioleta y la precipitación de partículas energéticas a la atmósfera terrestre, esto calienta la atmósfera causando que se expanda. Los satélites de órbitas más bajas se encuentran entonces sumergidos en una atmósfera más densa, lo cual incrementa el arrastre de ésta sobre ellos, alterando sus órbitas y causando que algunos de ellos se precipiten a tierra.

Por su lado, los satélites en órbitas altas están sujetos al bombardeo del viento solar: estos satélites normalmente se encuentran bien protegidos dentro de la Magnetosfera, pero si hay un evento particularmente intenso, por ejemplo una eyección de masa coronal muy energética, la Magnetosfera se comprime y el satélite queda fuera de su cobijo, entonces el impacto de las partículas energéticas y del viento solar corroe al satélite y pueden producir un exceso de carga eléctrica; las descargas eléctricas que de esto resultan causan daño a las componentes satelitales.

Por último, las radiotelecomunicaciones que se realizan a través de la Ionosfera, se ven también afectadas al producirse allí ionización adicional por la llegada de radiación en UV y rayos x, así como de partículas energéticas provenientes de eyecciones de masa coronal, fulguraciones solares o rayos cósmicos.

Hay un aspecto más que es interesante comentar. Los vuelos tripulados se realizan en órbitas bajas por lo que los astronautas están protegidos por la Magnetosfera, incluso por la propia nave si se encuentran adentro de ella. Pero si salen de ella están en mucho mayor peligro, pues algunas partículas

energéticas sí penetran la Magnetosfera y los astronautas están expuestos. Las misiones tripuladas que salieran por ejemplo a la Luna o a Marte, tendrían sin duda que enfrentarse a las partículas energéticas solares. Un viaje a Marte puede tomar 2 ó 3 años y el problema de la exposición se vuelve muy agudo. Si se piensa en una estación espacial, los astronautas que la construyeran tendrían que estar afuera de las naves por largos periodos de tiempo y estarían también expuestos. Los vuelos de las líneas aéreas en altas latitudes reciben dosis de partículas energéticas, pues el apantallamiento magnético es más débil en los polos. Aunque los daños a la salud aún no se han evaluado, algunos expertos recomiendan que las mujeres embarazadas no vuelen por estas rutas durante épocas de alta actividad solar.

## 7. EL SOL Y LA SALUD HUMANA

Los efectos biológicos de la actividad solar en el espacio son bien reconocidos: las radiaciones de onda corta del Sol (rayos X, ultravioleta) y partículas energéticas (tales como rayos cósmicos galácticos y solares), dañan a los astronautas que se encuentren fuera de las naves durante un periodo en el que éstos aumentan su flujo, lo cual ocurre en épocas de alta actividad solar. Se sabe que hay animales que usan el campo geomagnético para guiarse, como las aves migratorias. Estudios con pichones caseros muestran que ciertos tejidos en su cabeza y cuello contienen moléculas ricas en hierro, con propiedades magnéticas. Se observa que estas aves se desorientan cuando hay perturbaciones magnéticas. Se sospecha que los seres humanos somos también susceptibles a efectos magnéticos.

A principios del siglo XX, el naturalista ruso Leonidovich Chizhevski sugirió que hay una relación entre el Sol y la salud humana, después de observar que los periodos de epidemias de cólera en Rusia eran muy similares al ciclo de actividad solar. Él mismo bautizó a su estudio de la relación Sol-biósfera como "heliobiología", y hoy se le reconoce como padre de dicha ciencia. Esta área de estudio, aunque todavía muy controvertida, ha ganado terreno en la credibilidad de la comunidad científica con estudios rigurosos que han demostrado una buena relación entre los fenómenos de actividad solar y patologías cardiovasculares y nerviosas, y parámetros cardiovasculares en individuos saludables.

Los mecanismos físicos de la interacción entre la actividad solar y su propagación en el medio interplanetario, la magnetosfera, y la atmósfera son muy complejos. Para el caso de las relaciones Sol-salud humana se agregaría a todo lo anterior la interacción de los campos electromagnéticos del medio ambiente con el cuerpo humano, un sistema biológico altamente desarrollado. Así pues, ésta es una de las áreas científicas actuales más ambiciosas, que puede involucrar especialistas en varias ramas de la física y la biología.

La influencia del Sol sobre la salud humana se ha observado en varios estudios estadísticos que muestran correlaciones entre la incidencia de patologías cardíacas y mentales y variaciones notables en el campo geomagnético debidas a la actividad solar. A partir de los primeros trabajos de Chizhevski, en 1915, la comunidad científica rusa tomó el tema con gran interés. En cuanto a los trabajos occidentales, éstos se remontan al de Düll, en la década de 1930 con análisis de patologías mentales. Los científicos occidentales han tomado esta área con muchas reservas y empezaron estudios relacionados mucho más tarde. Durante la década de los sesenta y setenta los resultados de diversos estudios eran tanto a favor como en contra de una relación entre la actividad solar y la salud humana. Actualmente, los criterios estadísticos se han vuelto mucho más rigurosos, obteniéndose resultados que apoyan dicha relación, utilizando por ejemplo índices que miden la actividad geomagnética global y los decrementos Forbush en el flujo de rayos cósmicos, ambos causados por la actividad solar.

En México se han realizado estudios de carácter epidemiológico de la morbilidad citadina, encontrándose una relación entre el aumento en la tasa de infartos y los decrementos Forbush, y de mortalidad en el país, que muestra un incremento en la muerte por infartos al miocardio después de grandes tormentas magnéticas y después de un decremento Forbush. Se ha notado sobre todo una mayor incidencia de estos problemas de salud en personas vulnerables, como los ancianos, y en épocas en que la actividad solar es mayor, como lo muestra la Figura 24 (Mendoza y Díaz-Sandoval, 2000).

De lo expuesto anteriormente percibimos que hay evidencias de una relación entre el Sol, el clima y los seres vivos en nuestro planeta, y podemos concluir que cuando el Sol tose, a la Tierra le da pulmonía.

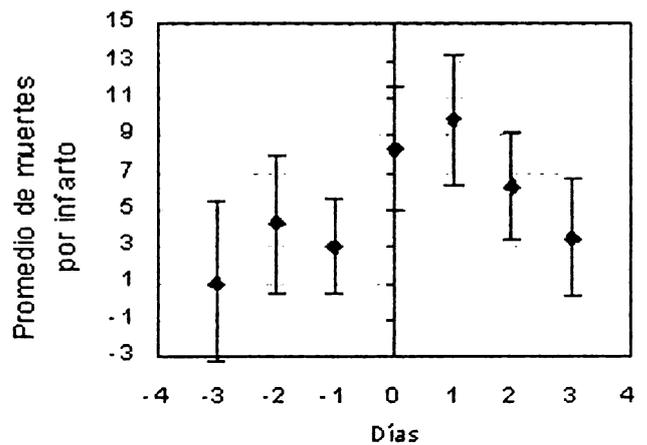


Fig. 24. Promedio de muertes diarias por infarto al miocardio para adultos mayores de 60 años (eje vertical). El cero del eje horizontal indica el día de la perturbación geomagnética, los valores negativos indican días anteriores y los positivos posteriores. Las barras indican el error en la estimación del porcentaje.

## 8. DISCUSIÓN

La observación directa de la IST durante los pasados 20 años ha producido un enorme avance en el entendimiento de sus variaciones y su posible impacto en el clima. Sin embargo, estos resultados motivan nuevas preguntas:

Por ejemplo Willson (1997, 2003) en su serie compuesta de la IST encuentra un aumento de 0.05% por década entre los ciclos solares 22 y 23, mientras que Fröhlich y Lean (1998) y Fröhlich (2000) en sus series compuestas no observan tal cambio. Estos resultados sugieren que de un ciclo solar a otro puede haber variaciones en la radiación base. Sin embargo, los datos comprenden un intervalo demasiado corto para sacar conclusiones.

La mayoría de los modelos suponen que casi todos los cambios de la IST se deben a la actividad magnética superficial. Sin embargo, de Toma *et al.* (2001) indican que aunque el ciclo solar 23 parece magnéticamente menos intenso que el 22, los datos instrumentales indican una IST similar para ambos ciclos. Una posibilidad es que los índices faculares y de manchas no representen adecuadamente a la IST de ciclo a ciclo, abriendo la posibilidad a otras fuentes para la variabilidad de la IST con una importancia comparable a la de esas dos clases de estructuras.

Las observaciones de la IST en los dos últimos ciclos indican un incremento de ésta dentro de cada

ciclo entre el mínimo solar y el máximo solar. La explicación es que durante el máximo de manchas solares las fáculas y otros elementos magnéticos dominan sobre las manchas. Foukal (1993) mostró que entre 1874 y 1976, durante los máximos solares, en efecto las fáculas dominaron sobre las manchas, excepto para el ciclo más activo del periodo de estudio que fue el 19, cuando las manchas dominaron sobre las fáculas. Este resultado implica que si el Sol se vuelve extremadamente activo los cambios de la IST se darán opuestos al aumento de actividad dentro de un ciclo.

Aun más, Mendoza y Ramírez (2001) propusieron la posibilidad de que el Sol extremadamente inactivo también presenta este comportamiento: se puede volver menos luminoso cuando va del mínimo al máximo.

Como ya se mencionó, en varios modelos de la IST se considera una variación secular de ésta. La existencia de tal variación es cuestionable de acuerdo con estudios realizados por Foukal (2002). El indica que datos satelitales de la IST muestran que sus variaciones son proporcionales a la diferencia entre áreas de manchas y áreas faculares, la cual varía de ciclo a ciclo y por tanto no es de esperarse que sea representada por algún índice de actividad solar. Reconstruye la IST de 1915 a 1999 sin considerar una variación a largo plazo y encuentra que la IST y la temperatura global terrestre tienen una correlación de  $r = 0.91$ ; sin embargo, la amplitud de las variaciones de la IST es insuficiente para influir en el calentamiento global de los modelos actuales. Lean *et al.* (2002) indican que la IST proviene principalmente de las regiones de campo magnético cerrado; el flujo magnético cerrado es un orden de magnitud mayor que el abierto. El flujo abierto y el cerrado se comportan de manera diferente, parece que el abierto tiene una variación de largo plazo mientras que el cerrado no la muestra, pero hay todavía muy pocas observaciones del flujo para concluir algo. Si esto se corroborara, entonces la IST no debiera mostrar una variación a largo plazo, de acuerdo con los resultados de Foukal (2002) y la IST compuesta de Fröhlich y Lean (1998) y Fröhlich (2000), y en desacuerdo con los resultados de Willson (1997) y Willson y Mordvinov (2003).

La existencia de una variación de largo plazo de la irradiancia se postula con base en extrapolaciones del comportamiento de las estrellas de tipo

solar: hay evidencias de que la emisión de las líneas de Ca II H y K presentan una variación mucho mayor que la del Sol a lo largo de sus ciclos estelares de actividad. En el Sol, la brillantez de la línea del Ca II está bien correlacionada con estructuras magnéticas tales como las fáculas. Muchas de las estrellas de tipo solar presentan una emisión mucho más débil de Ca II que el Sol durante el mínimo; tales estrellas se supone que están en un estado de actividad tipo mínimo de Maunder (Baliunas and Jastrow, 1990). Por otro lado, las variaciones de los isótopos comogénicos (Beer, 2000) que son indicadores de los rayos cósmicos, sugieren que el Sol ha presentado una gama amplia de variación en su actividad y por tanto en su radiación. Sin embargo, Lean *et al.* (2002) dicen que los cambios en los isótopos, que implican cambios en el campo abierto, no necesariamente reflejan cambios en la IST que se asocia con campos cerrados.

Si no existen cambios a largo plazo de la IST, entonces la modulación climática de la IST en los modelos de clima será reducida a casi un tercio. Entonces ¿cómo explicar la buena correlación entre temperatura y IST? Tal vez existe un mecanismo amplificador de la IST. Kristjánsson *et al.* (2002) para 1983-1999, encuentran que la IST y las nubes están muy bien relacionadas y sugieren que las variaciones de la IST se amplifican vía una interacción con la temperatura superficial del mar y luego con las nubes bajas en las regiones subtropicales. Las nubes a su vez afectan el albedo produciendo cambios más sustanciales de temperatura.

## 9. CONCLUSIONES

La variación secular de la IST contribuye considerablemente a las variaciones de la temperatura terrestre en la era preindustrial. Pero ya desde entonces otras fuentes internas y relacionadas con la actividad solar estaban contribuyendo a estos cambios.

Durante el siglo 20, de acuerdo con los modelos, la IST produce menos de la mitad de los cambios de temperatura observados, confirmando que aparte de las causas naturales, las actividades antropogénicas han contribuido al cambio de temperatura.

Se necesitan datos confiables de temperatura para poder evaluar los diferentes factores que contribuyen al cambio climático.

Han surgido algunas preguntas sobre la IST y el clima: Son las variaciones de la IST de ciclo a ciclo representadas por manchas solares y fáculas? ¿Las variaciones de la IST siempre ocurren en consonancia con la actividad solar? ¿Hay una componente secular variable de la IST? Y muy relacionada con esta última pregunta ¿Es la IST del Sol quieto constante ciclo a ciclo? Si no hay una variación secular de la IST, entonces se necesitan mecanismos amplificadores de esta variación para poder explicar su buena relación con los cambios de la temperatura terrestre.

### BIBLIOGRAFÍA

- 1) Introduction to plasma physics  
Francis F. Chen  
Plenum Press, 1974
- 2) Introduction to the Space Environment.  
Thomas F. Tascione.  
Krieger Publ. Co., 1994.
- 3) The Sun Our Star  
Robert W. Noyes  
Harvard University Press, 1982.
- 4) Guide to the Sun  
Kenneth J.H. Phillips  
Cambridge Univ. Press, 1992.
- 5) Los Rayos Cósmicos: Mensajeros de las Estrellas  
Javier A. Otaola y José F. Valdés-Galicia  
Vol. 108 de la Serie la Ciencia desde México.  
Fondo de Cultura Económica, México 1992.
- 6) The Upper Atmosphere and Solar Terrestrial Relations  
J. K. Hargreaves,  
K. Van Nostrand, 1979.
- 7) Handbook of Geophysics and the Space Environment  
Editor: Adolph S. Jursa,  
Air Force Geophysics Laboratory, 1995.
- 8) El Sol y la Tierra: una Relación Tormentosa  
Javier Otaola, Blanca Mendoza y Román Pérez  
Vol. 114 de la Serie la Ciencia desde México,  
Fondo de Cultura Económica, 1993.
- 9) Introduction to Planetary Geology  
Billy P. Glass  
Cambridge University Press, 1982.

### REFERENCIAS

- ANDERSON, R.Y., 1992. Long-term changes in the frequency of occurrence of El Niño events. *In: El Niño, historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation.* H.F. Diaz and V. Markgraf (eds.) Cambridge Univ. Press, 193-200.
- BALIUNAS, S. y R. JASTROW, 1990. Evidence for long-term brightness changes of solar-like stars. *Nature* 348, 520-523.
- BEER, J., 2000. Long-term indirect indices of solar variability. *Space Sci. Rev.* 94, 53-66.
- BRADLEY, R. S. y P. D. JONES, 1992. Records of explosive volcanic eruptions over the last 500 years. *In: Bradley, R.S., Jones, P.D. (Eds.), Climate since AD 1500.* Cambridge Univ. Press., New York, pp. 606-621.
- BRIFFA, K. R., T. J. OSBORN, F. H. SCHWEINGRUBER, I. C. HARRIS, P. D. JONES, S. G. SHIYATOV y E. A. VAGANOV, 2001. Low frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *J. Geophys. Res.* 106, 2929-2941.
- CROWLEY, T. J., 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289, 270-277.
- CUBASCH, U. y R. VOSS, 2000. The influence of total solar irradiance on climate. *Space Sci. Rev.* 94, 185-198.
- DE TOMA, G., O. R. WHITE, B. G. KNAPP, G. J. ROTTMAN y T. N. WOODS, 1997. MgII core-to-wing index: composition of SBUV 2 and SOLSTICE time series. *J. Geophys. Res.* 102, 2597-2610.
- DE TOMA, G., O. R. WHITE, G. A. CHAPMAN, S. R. WALTON, D. G. PREMINGER, A. M. COOKSON y K. L. HARVEY, 2001. Differences in the Sun's radiative output in cycles 22 and 23. *Astrophys. J.* 549, L131-L134, 2001.
- FLIGGE, M., S. K. SOLANKI, J. M. PAP, C. FRÖHLICH y CH. WEHRLI, 2001. Variations of solar spectral irradiance from near UV to the infrared - measurements and results. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 63, 1479-1487.

- FRÖHLICH, C., 2000. Observations of irradiance variations. *Space Science Rev.* 94, 15-24.
- FRÖHLICH, C., 2002. Total solar irradiance variations since 1978. *Adv. Space Res.* 29, 1409-1416.
- FRÖHLICH, C. y J. LEAN, 1998. The Sun's total irradiance: cycles, trends and climate change uncertainties since 1976. *Geophys. Res. Lett.* 25, 4377-4380.
- FOUKAL, P. y J. LEAN, 1988. Magnetic modulation of solar luminosity by photospheric activity. *Astrophys. J.* 328, 347-357.
- FOUKAL, P., 1993. The curious case of the Greenwich faculae. *Solar Phys.* 148, 219-232.
- FOUKAL, P. A., 2002. Comparison of variable solar total and ultraviolet irradiance outputs in the 20th century. *Geophys. Res. Lett.* 29, 2089-2092.
- HAIGH, J. D., 1999. A GCM study of climate change in response to the 11-year solar cycle. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 125, 871-892.
- HOUGHTON, J. T., L. G. MEIRA FILHO, B. A. CALLANDER, N. HARRIS, A. KATTENBERG y K. MASKELL, (Eds.), 1996. *Climate Change 1995: The science of climate change*. Cambridge Univ. Press, New York.
- HOYT, D. V. y K. H. SCHATTEN, 1993. A discusión of plausible solar irradiance variations, 1700-1992. *J. Geophys. Res.* 98, 18895-18906.
- HOYT, D. V. y K. H. SCHATTEN, 1997. *The role of the sun in climate change*, Oxford Univ. Press.
- IPCC TAR, 2001. (Intergovernmental Panel on Climate Change, Third Assessment Report 2001). *Climate Change 2001: The scientific basis*, Houghton, J. T., Ding, Y., Giggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.). Cambridge Univ. Press.
- KRISTJÁNSSON, J. E., A. STAPLE y J. KRISTIANSEN, 2002. A new look at possible connection between solar activity, clouds and climate. *Geophys. Res. Lett.* 29, 2107-2110.
- KUHN, J. R. y K. G. LIBBRECHT, 1991. Nonfacular solar luminosity variation. *Astrophys. J. Lett.* 381, L35-L37.
- LARKIN, A., J. D. HAIGH y S. DJAVIDNIA, 2000. The effect of solar UV irradiance variations on the Earth's atmosphere. *Space Sci. Rev.* 94, 199-214.
- LAUT, P., 2003. Solar activity and terrestrial climate: an analysis of some purported correlations. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 65, 801-812.
- LEAN, J., 2000. Short-term direct indices of solar variability. *Adv. Space Res.* 94, 39-51.
- LEAN, J., J. BEER y R. BRADLEY, 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change. *Geophys. Res. Lett.* 22, 3195-3198.
- LEAN, J., G. J. ROTTMAN, H. L. KYLE, T. N. WOODS, J. R. HICKEY y L. C. PUGA, 1997. Detection and parameterization of variations in solar-mid-and-near-ultraviolet radiation (200-400nm). *J. Geophys. Res.* 102, 29939-29956.
- LEAN, J., J. COOK, W. MARQUETTE y A. JOHANNESSEN, 1998. Magnetic sources of the solar irradiance cycle. *Astrophys. J.* 492, 390-401.
- LEAN, J., Y.-M. WANG y N. R. SHEELEY Jr., 2002. The effect of increasing solar activity on the sun's total and open magnetic flux multiple cycles: implications for solar forcing of climate. *Geophys. Res. Lett.* 29, 2224-2227.
- MARSH, N. D. y H. SVENSMARK, 2000. Low cloud properties influenced by cosmic rays. *Phys. Rev. Lett.* 85, 5004-5007.
- MENDOZA, B., R. PÉREZ-ENRÍQUEZ y M. ÁLVAREZ-MADRIGAL, 1991. Analysis of solar activity conditions during periods of El Niño events. *Ann. Geophys.* 9, 50-54.
- MENDOZA, B., 1997. Estimations of Maunder minimum solar irradiance and Ca II H and K fluxes using rotation rates and diameters. *Astrophys. J.* 483, 523-526.

- MENDOZA, B. y DÍAZ-SANDOVAL, 2000. Relationship between solar activity and myocardial infarctions in Mexico City. *Geofis. Int.*, 39, 53-56.
- MENDOZA, B., A. LARA, D. MARAVILLA y E. JÁUREGUI, 2001. Temperature variability in central Mexico and its possible association to solar activity. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 63, 1891-1900.
- MENDOZA, B. y J. RAMÍREZ, 2001. Can the low-activity sun become dimmer at maximum? *Solar Phys.* 199, 201-209.
- PAETH, H., A. HENSE, R. GLOWIENKA-HENSE, R. VOSS y U. CUBASCH, 1999. The North Atlantic oscillation as an indicator for greenhouse-gas induced climate change. *Clim. Dyn.* 15, 953-960.
- PALLÉ-BAGÓ, E. y C. J. BUTLER, 2000. The influence of cosmic rays on terrestrial clouds and global warming. *Astron. Geophys.* 41, 418-422.
- PUDOVKIN, M. I. y S. V. VERETENENKO, 1995. Cloudiness decreases associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 57, 1349-1355.
- RAMÍREZ, J., B. MENDOZA, V. MENDOZA y J. ADEM, 2004. Modelling the effect of an assumed cosmic-ray modulated global cloud cover on the terrestrial surface temperature. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 66, 1683-1690.
- RAMÍREZ, J., V. MENDOZA, B. MENDOZA y J. ADEM, 2006. Effects of an assumed cosmic ray-modulated low global cloud cover on the Earth's temperature. *Atmósfera*, en prensa.
- ROTTMAN, G., 2000. Variations of solar ultraviolet irradiance observed by the UARS SOLSTICE-1991 to 1999. *Space Sci. Rev.* 94, 83-91.
- SHINDELL, D., D. RIND, N. BALACHANDRAN, J. LEAN y P. LONERGAN, 1999. Solar cycle variability, ozone and climate. *Science* 284, 305-308.
- SHINDELL, D. T., G. A. SCHMIDT, M. E. MANN, D. RIND y A. WAPLE, 2001. Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum. *Science* 294, 2149-2152.
- SOFIA, S. y P. FOX, 1994. Solar variability and climate. *Climatic Change* 27, 249-257.
- SOLANKI, S. K. y M. FLIGGE, 1998. Solar irradiance since 1874 revisited. *Geophys. Res. Lett.* 25, 341-344.
- SOLANKI, S. K. y M. FLIGGE, 1999. A reconstruction of total solar irradiance since 1700. *Geophys. Res. Lett.* 26, 2465-2468.
- SOLANKI, S. K. y M. FLIGGE, 2002. How much of the solar irradiance variations is caused by the magnetic field at the solar surface? *Adv. Space Res.* 29, 1933-1940.
- SOLANKI, S. K. y Y. C. UNRUH, 1998. A model of the wavelength dependence of solar irradiance variations. *Astron. Astrophys.* 329, 747-753.
- SOLANKI, S. K. y N. A. KRIVOVA, 2003. Can solar variability explain global warming since 1970? *J. Geophys. Res.* 108, 1200-1207.
- SOON, W. y S. BALIUNAS, 2003. Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years. *Climate Res.* 23, 89-110.
- SVENSMARK, H. y E. FRIIS-CHRISTENSEN, 1997. Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage-a missing link in solar-climate relationships. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 59, 1225-1232.
- TINSLEY, B. A., 2000. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature and dynamics in the troposphere. *Space Sci. Rev.* 94, 231-258.
- TOON, O. B. y J. B. POLLACK, 1980. Atmospheric aerosol and climate. *Amer. Scientist* 68, 268-278.
- WILLSON, R. C., 1997. Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22. *Science* 277, 1963-1965.
- WILLSON, R. C. y A. V. MORDVINOV, 2003. Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23. *Geophys. Res. Lett.* 30, 1199-1202.
- WOLFF, C. L. y J. R. HICKEY, 1987. Multiperiodic irradiance changes caused by r-modes and g-modes. *Solar Phys.* 109, 1-18.